

**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

**МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА**

<small>Тема работы</small>
<b>Моделирование гистерезиса процесса реактивного магнетронного напыления оксидов и нитридов титана</b>

УДК 661.88:621.793.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Медетхан А.Е.		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф.менед.ИСГТ	Рыжакина Т.Г.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2017 г.

**Результаты обучения магистров  
направления 16.04.01 «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	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ПК-5, ПК- 8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учетом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, и формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Заниматься организационно-управленческой деятельностью, владеть приемами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ПК-17, 18, 19). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Осуществлять научно-инновационную деятельность, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоемкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 3, 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК - 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОК-4, 5, ОПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки (специальность) 16.04.01 «Техническая физика»  
Кафедра Экспериментальная физика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Кривобоков В.П.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Медетхан Арай Еренбайкызы

Тема работы:

**Моделирование гистерезиса процесса реактивного магнетронного напыления оксидов и нитридов титана**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Магнетронная распылительная система УВН-200МИ</li><li>2. Компьютерная программа RSD2013</li></ol>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Изучить существующие модели реактивного магнетронного напыления и их реализацию в программных продуктах.</li><li>2. Провести расчеты согласно стационарной модели для установки среднечастотного магнетронного напыления для различных режимов работы установки</li><li>3. Провести расчеты согласно нестационарной модели для установки среднечастотного магнетронного напыления для различных режимов работы установки</li><li>4. Сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными и уточнить значения параметров модели.</li><li>5. На основании расчетов с уточненными параметрами определить условия возникновения гистерезиса процесса напыления.</li></ol>

<b>Перечень графического материала</b>	- титульный лист; - актуальность работы; - цель работы и задачи; - явление гистерезиса; - модель Деблы для РМН; - программа RSD2013; - исходные данные для моделирования; - расчеты согласно стационарной модели; - расчеты согласно нестационарной модели; - сравнение теоретических данных с экспериментальными данными; - заключение
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Литературный обзор	Евдокимов К.Е., доцент кафедры ЭФ ФТИ ТПУ
Расчетная часть	Евдокимов К.Е., доцент кафедры ЭФ ФТИ ТПУ
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Рыжакина Т.Г., доцент каф. МЕН ИСГТ ТПУ
«Социальная ответственность»	Гоголева Т.С., ассистент каф. ПФ ФТИ ТПУ
По иностранному языку	Зяблова Н.Н., ст. преп. каф. ИЯ ФТИ ТПУ
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках</b>	1) Теоретическая часть 2) Материалы и методики исследований 3) Расчетная часть 4) Materials and methods of research

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Медетхан А.Е.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ51	Медетхан А.Е.

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	Экспериментальной физики
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	16.04.01 «Техническая физика»

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</b>	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость сырья и материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке</b>	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Разработка анализа конкурентоспособности
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	График проведения ВКР – диаграмма Ганта
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка сравнительной и финансовой эффективности
<b>Перечень графического материала</b>	
<i>1. Оценка конкурентоспособности технических решений                  2. Матрица SWOT                  3. График проведения и бюджет НТИ                  4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>	

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф.менед. ИСГТ	Рыжакина Т.Г.	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ51	Медетхан А.Е.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ51	Медетхан Арай Еренбайкызы

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	Экспериментальной физики
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	16.04.01 «Техническая физика»

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны,) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возможных вредных факторов: вредные вещества, шумы, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ЭВМ;</li> <li>– опасные факторов: вероятность поражения электрическим током, вероятность возникновения пожара и взрыва.</li> </ul>
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых;</li> <li>– предлагаемые средства защиты .</li> </ul>
<i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ51	Медетхан Арай Еренбайкызы		

## РЕФЕРАТ

Данная выпускная квалификационная работа содержит 116с, 41 рисунков, 37 таблиц, 35 источников.

Целью работы является изучить зависимость параметров нанесения покрытий из оксидов и нитридов титана от режимов работы установки среднечастотного магнетронного напыления с помощью стационарной и нестационарной моделей процесса и определить условия возникновения гистерезиса в процессе напыления

В работе представлены теоретические основы по плёнкам, методы осаждения, модель Берга и Деплы, реализация модели Деплы в программных продуктах.

В ходе работы были определены зависимости гистерезиса от параметров процесса и определены области гистерезиса, а также теоретические данные были сравнены с экспериментальными данными.

Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный режим для установки УВН-200МИ.

Ключевые слова: оксид и нитрид титана, реактивное магнетронное напыление, гистерезис, плазма, модель Берга, модель Депла.



## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	12
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	13
1.1 Плёнки оксида и нитрида титана .....	13
1.2 Реактивное магнетронное напыление .....	15
1.3 Гистерезис в процессе напыления .....	16
1.4 Модель Берга .....	18
1.5 Модель Деллы.....	22
1.5.1 Вакуумная камера .....	23
1.5.2 Мишень .....	25
1.5.3 Поверхность мишени .....	26
1.5.4 Приповерхностный слой мишени.....	28
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ .....	31
2.1 Описание установки УВН – 200МИ .....	31
2.2 Алгоритм работы с программой RSD .....	32
3.РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.....	38
3.1 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана при разных значениях тока.....	38
3.2 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от мощности.....	39
3.3 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от давления рабочего газа.....	40
3.4 Исследование зависимости процесса оксида титана от скорости химической реакции в приповерхностном слое .....	42
3.5 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от коэффициента прилипания .....	43
3.6 Исследование зависимости гистерезиса нитрида титана от мощности .....	44
3.7 Исследование зависимости гистерезиса от давления рабочего газа для нитрида титана .....	45
3.8 Исследование зависимость гистерезиса нитрида титана от скорости химической реакции в приповерхностном слое .....	46
3.9 Исследование зависимости гистерезиса от коэффициента прилипания.....	47
3.10 Исследование зависимости доли $\theta_m$ , $\theta_c$ , $\theta_f$ поверхности подложки и мишени, покрытых металлом и соединением от расхода для оксида и нитрида титана.....	48
3.11 Расчеты согласно нестационарной модели для установки среднечастотного магнетронного напыления .....	50
3.11 Анализ результатов расчета с экспериментальными данными и уточненными значениями параметров модели .....	53
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	58
4.1Предпроектный анализ .....	58

4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	58
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	58
4.1.3	SWOT-анализа .....	59
4.2	Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	63
4.3	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	65
4.4	Инициация проекта .....	67
4.4.1	Организационная структура проекта.....	68
4.4.2	Ограничения и допущения проекта.....	70
4.5	Планирование управления научно-техническим проектом .....	70
4.5.1	Иерархическая структура работ проекта .....	70
4.5.2	Контрольные события проекта .....	72
4.6	Планирование управления научно-техническим проектом .....	73
4.6.1	План проекта.....	73
4.7	Бюджет научного исследования .....	74
4.7.1	Основная заработная плата .....	75
4.7.2	Основная заработная плата .....	76
4.7.3	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала .....	76
4.7.4	Отчисления на социальные нужды.....	77
4.7.5	Организационная структура проекта.....	77
4.8	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	78
4.8.1	Динамические методы экономической оценки инвестиций .....	79
4.8.2	Чистая текущая стоимость ( <b>NPV</b> ).....	79
4.8.3	Дисконтированный срок окупаемости .....	81
4.8.4	Внутренняя ставка доходности ( <b>IRR</b> ).....	81
4.9	Индекс доходности (рентабельности) инвестиций ( <b>PI</b> ).....	83
4.9.1	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	83
5	<b>СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ</b> .....	88
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	88
5.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ. ....	89
5.2.1	Требования к ПЭВМ и организация работы организационные мероприятия.....	89
5.3	Технические мероприятия.....	89
5.4	Условия безопасной работы.....	92

5.5	Электробезопасность .....	96
5.6	Пожарная и взрывная безопасность .....	98
	Заключение.....	101
	Список литературных источников.....	103
	Приложение А.....	106

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема нанесения тонкопленочных покрытий является едва ли не самой обширной среди современных актуальных направлений технологии и материаловедения. В ней переплетаются научные аспекты, относящиеся к физике, химии, механике. Тонкопленочные покрытия применяются во многих областях человеческой жизнедеятельности и потребность в них постоянно возрастает [1].

Реактивное магнетронное распыление - это универсальная плазменная технология для нанесения тонких слоев сложного материала на все виды объектов. Термин «тонкий» здесь означает толщину от нескольких нанометров до нескольких микрон. Этот метод хорошо зарекомендовал себя в промышленности и нашел свое применение в многочисленных технологических установках [2].

За десятилетия использования этой технологии было создано несколько вариантов конструкции магнетрона. Эти конструкции могут отличаться по геометрии мишени, форме магнитного поля и электрическим рабочим характеристикам. Характерным для реактивного распыления является явление гистерезиса. Это явление проявляется в том, что условия работы не однозначно определяются мгновенными значениями управляющих параметров, но зависят от предыстории. Гистерезис можно исследовать с помощью моделирования процесса.

Моделирование сложных процессов позволяет сократить количество экспериментов, необходимых для поиска оптимального режима. Это особенно актуально для такого процесса как реактивное распыление, параметры которого сложным образом зависят друг от друга. Моделирование процессов, происходящих при распылении в реактивной среде, позволяет установить взаимосвязь между внешними и внутренними параметрами процесса и определить состояние мишени и стехиометрию наносимых слоев при любом потоке реактивного газа.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Плёнки оксида и нитрида титана

Тонкие плёнки- — тонкие слои материала, толщина которых находится в диапазоне от долей нанометра (моноатомного слоя) до нескольких микрон.

В природе оксид титана  $\text{TiO}_2$ , существует в виде кристаллов с тетрагональной сингонией (анатаз, рутил) и ромбической сингонией (брукит). Структура  $\text{TiO}_2$  в рутильной форме представлена на рисунке 1.1 Искусственно получены еще две модификации высокого давления — ромбическая IV и гексагональная V.

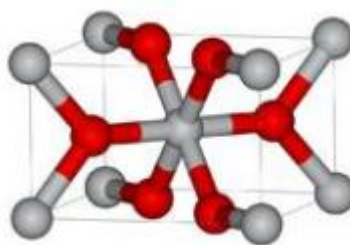


Рисунок 1.1 – Диоксид титана в рутильной форме. Ti- серый цвет, O- красный цвет

Плёнки  $\text{TiO}_2$  относятся к группе оксидов переходных металлов, которые обладают свойствами широкозонных полупроводников. Типичное значение ширины запрещенной зоны для плёнок  $\text{TiO}_2$  – 3.2 эВ [3].

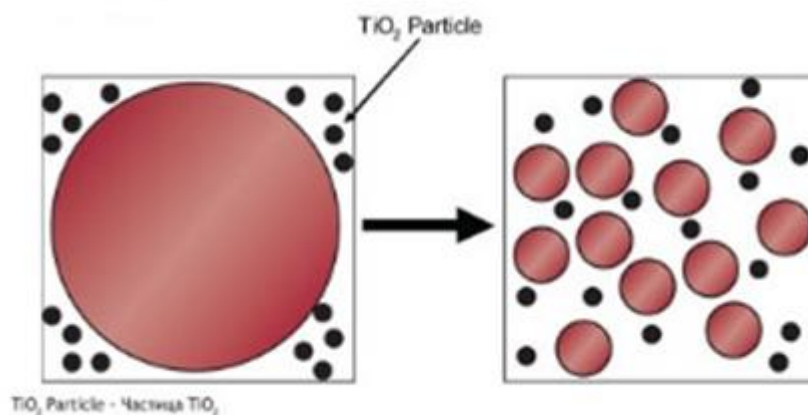


Рисунок 1.2 – Частица  $\text{TiO}_2$

Нитрид титана— соединение титана и азота состава  $TiN_x$  ( $x = 0,58 \div 1,00$ ), представляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности. Получение — азотированием титана при  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  или другими способами. Применяется как жаропрочный материал, для создания износостойких покрытий, используется в микроэлектронике в качестве диффузионного барьера совместно с медной металлизацией и др [4,5].



Рисунок 1.3 – Нитрид титана

Одним из основных физических свойств материала является свойства его поверхности. Поверхностные слои, толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрометров часто оказывают более сильное влияние на общие свойства материала или изделия, чем весь остальной материал изделия.

Одним из основных физических свойств материала является свойства его поверхности. Поверхностные слои, толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрометров часто оказывают более сильное влияние на общие свойства материала или изделия, чем весь остальной материал изделия.

Нанесение защитных и декоративных покрытий с использованием вакуумных ионно-плазменных (магнетронного, конденсации с ионной бомбардировкой методов напыления является одним из самых современных способов обработки поверхности. Используя вакуумные методы нанесения

покрытий, можно формировать поверхностные плёнки из различных металлов и их соединений [6].

## 1.2 Реактивное магнетронное напыление

Реактивное магнетронное распыление является важным промышленным методом для осаждения широкого спектра таких как оксиды и нитриды [7,8]. Реактивное напыление имеет большую научно-техническую значимость. Одним из преимуществ реактивного распыления на постоянном токе является его простота по сравнению с альтернативными вариантами. Тем не менее, физика процесса является сложной. Реактивное магнетронное напыление позволяет контролировать рост покрытий на большой площади подложки, не допускать перегрев подложки и загрязнение плёнки. Этот метод позволяет контролировать состав при нанесении тонких пленок на основе металлов и их сплавов. На рисунке 1.4 показана схема системы магнетронного распыления.

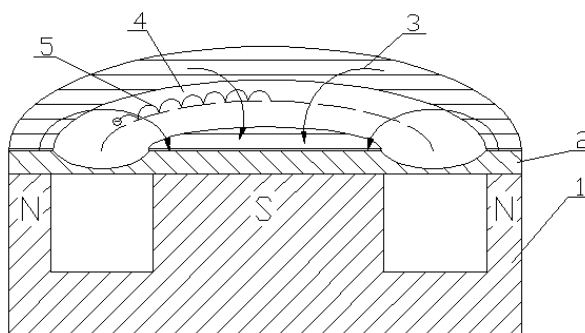


Рисунок 1.4 – Схема системы магнетронного распыления:

1 – магнитная система; 2 – катод-мишень; 3 – силовая линия магнитного поля; 4 – зона наибольшей эрозии поверхности катода; 5 – траектория движения электрона

Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки.

### 1.3 Гистерезис в процессе напыления

Гистерезис – процесс, когда система помнит свою предыдущую состояние, состояние в данный момент времени зависит от состояния предыдущего момента. В обычной ситуации давление зависит от расхода напрямую, а в данном случае зависит от предыстории изменения расхода. В области гистерезиса состояние не является стабильным, то есть небольшое изменение условий может вывести систему из металлического в режим оксидный или нитридный [9-11].

Гистерезис почти неизбежно возникает при реактивном напылении. Это приводит к тому, что характеристики процесса зависят не только от текущих условий напыления, но и от предыдущих. Таким образом, режим напыления не однозначно зависит от рабочих параметров. Происхождение этого явления вызвано тем, что в процессе реактивного напыления на мишени образуется соединение. Первым необходимым условием возникновения гистерезисного эффекта является то, что коэффициенты распыления распыляемого материала элементарной мишени и образовавшегося соединения существенно отличаются. Коэффициент распыления осажденных соединений, таких как оксиды, нитриды и карбиды, обычно намного меньше, чем у элементарного металла. Второе необходимое условие состоит в том, что расход реактивного газа подложки и мишенью для образования соединения по меньшей мере сравним со скоростью откачки этого газа вакуумной системой. На рисунке 1.5 показан типичный гистерезис.





Рисунок 1.5 – Кривой гистерезиса при реактивном магнетронном распылении

Если мощность разряда будет постоянной, в начале процесса реактивного магнетронного напыления при увеличении потока реактивного газа вначале его парциальное давление в камере будет оставаться низким. Реактивный газ взаимодействует с распыленными атомами металла, который в данной ситуации работает как геттерный насос. Когда расход реактивного газа достигает до определенной степени (см. рисунок 1.5, точка A на кривой гистерезиса), парциальное давление кислорода резко увеличивается (до точки B). Подобное изменение связано с «отравлением» поверхности катода. Возникающее на его поверхности соединение обладает более низким коэффициентом распыления, что приводит к резкому падению скорости распыления катода. В итоге уменьшается доля металла, взаимодействующего с реактивным газом, и парциальное давление последнего увеличивается. Увеличение расхода реактивного газа ведёт к линейному увеличению парциального давления. В момент, когда расход реактивного газа уменьшится до уровня, лежащего ниже точки B, то его парциальное давление не уменьшится до предыдущих низких значений. Парциальное давление будет относительно высоким до тех пор, пока с поверхности катода не удалится диэлектрическая плёнка в результате распыления (точка C). После удаление пленки увеличится коэффициент

распыления и, следовательно, доля распыленного материала. Этот материал будет реагировать с реактивным газом и в результате геттерного эффекта парциальное давление последнего снизится до точки D. Работать в области A и B очень трудно, потому что любые отклонения от заданных параметров, например, в результате дугообразования на катоде, могут привести к его отравлению. Так как распыленный материал формирует соединение с реактивным газом, то его можно расценивать как внутренний насос, который уменьшает парциальное давление реактивного газа в камере. Эффект гистерезиса прослеживается, когда скорость откачки ( $S_i$ ) этого насоса становится сравнима со скоростью откачки внешнего насоса  $S_e$ . Для устойчивой работы реактивных магнетронных систем нужно использовать вакуумные насосы с высокой скоростью откачки ( $S_e/S_i > 10$ ). В следствие эффекта гистерезиса при одинаковой мощности разряда, скорость нанесения могут быть различаться на порядок, а состав плёнки изменяться. Присутствие данного эффекта существенно усложняет контроль над процессом. В то же время, именно область гистерезиса представляет большой интерес, потому что в этой области можно совместить большую скорость распыления, присущую чистой мишени, и высокое давление реактивного газа, необходимое для получения стехиометрических плёнок.

#### **1.4 Модель Берга**

Модель Берга [12] – одна из наиболее известных моделей реактивного магнетронного напыления, описывающая гистерезис процесса. Несмотря на сравнительную простоту, модель описывает нелинейность процесса реактивного напыления в зависимости от условий проведения эксперимента и свойств материала. Модель Берга основана на анализе баланса потоков распыленного материала и скорости поглощения реактивного газа. Модель позволяет рассчитать для данного ионного тока и расхода реактивного газа скорость изменения парциального давления, скорость распыления, среднюю

стехиометрию пленки и состояние мишени. Для упрощения модель ограничивается только небольшими концентрациями реактивного газа (<10%). Поэтому в вычислениях пренебрегается влиянием процесса распыления мишени ионами реактивного газа [13].

Состав поверхности, как мишени, так и подложки определяется относительной долей их площадей  $\theta$ , покрытых молекулами соединения. Следовательно, доля поверхности  $(1 - \theta)$  покрыта чистым металлом. В общем случае значение  $\theta$  может быть различным для мишени ( $\theta_t$ ) и для подложки ( $\theta_s$ ). Модель не может корректно учитывать адсорбцию реактивного газа на поверхности, уже покрытой слоем соединения. Таким образом, эти расчеты справедливы лишь для получения соединений с концентрацией атомов реактивного газа не превышающей стехиометрическую.

Поступающий в камеру реактивный газ расходуется на образование соединения на поверхности мишени и подложки (стенках камеры) и удаляется системой откачки. Количество молекул реактивного газа, поглощенных поверхностью катода площадью  $S_t$  в единицу времени, равно

$$Q_t = 2[\alpha_m F_a (1 - \theta_t) + \alpha_m F_a \theta_t] S_t \quad (1.1)$$

где  $\alpha_m$  – вероятность прилипания молекул реактивного газа к части  $(1 - \theta_t)$  поверхности  $S_t$ ;  $\alpha_m$  - вероятность прилипания молекул реактивного газа к части  $(\theta_t)$  поверхности. В формулу введен коэффициент 2, указывающий на то, что поглощение одной молекулы реактивного газа (например,  $N_2$ ,  $O_2$ ) приводит к образованию двух молекул соединения. Скорость поглощения реактивного газа зависит от его парциального давления  $P_R$

$$F_a = \frac{P_R}{4} \left( \frac{8}{\pi m_R} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

где, а  $m_R$  – масса молекулы реактивного газа.

Количество молекул реактивного газа, поглощенных пленкой на подложке и стенках камеры площадью  $S_s$  в единицу времени, равно

$$Q_s = 2[\alpha_{sm} F_a (1 - \theta_s) + \alpha_{sn} F_a \theta_s] S_s \quad (1.3)$$

где,  $\alpha_{sm}$  – вероятность прилипания молекул реактивного газа к части  $(1 - \theta_s)$  поверхности  $S_s$ ,  $\alpha_{sn}$  – вероятность прилипания молекул реактивного газа к части  $(\theta_s)$  поверхности  $S_s$ .

Количество удаляемых из камеры молекул реактивного газа системой откачки рассчитывается по формуле

$$Q_p = n_g F_p \quad (1.4)$$

где  $F_p$  – скорость откачки газа, развиваемая насосом,  $n_g$  – плотность молекул реактивного газа в рабочей камере:

$$n_g = P_R / kT \quad (1.5)$$

Скорость натекания реактивного газа должна быть равна скорости его поглощения:

$$Q = Q_t + Q_s + Q_p \quad (1.6)$$

В случае если расстояние между электродами катодом и стенкой (подложкой) много меньше, чем характерный размер электродов, то краевыми эффектами можно пренебречь. Все распыленные с поверхности мишени частицы обязаны либо достичь подложки, либо, в результате рассеяния в газе, возвратиться на мишень. Очевидно, что увеличение давления газа будет уменьшать число частиц, достигающих подложки и стенок камеры, и соответственно увеличивать число частиц, возвратившихся на мишень [14].

Используя сформулированные допущения, можно записать соотношение, определяющее равновесие между потоком реактивного газа, поглощаемого поверхностью мишени, и потоком реактивного газа, удаляемого с этой поверхности за счет распыления:

$$2[\alpha_{sm} F_a (1 - \theta_t) + \alpha_{sn} F_a \theta_t] = \frac{j_t}{e} Y_R \theta_t \quad (1.7)$$

где  $j_t$  – плотность тока ионов бомбардирующих мишень,  $Y_R$  – коэффициент распыления молекул соединения с поверхности металлической мишени. В соотношении предполагается, что в молекулу соединения входит

только один атом реактивного газа. Такое предположение справедливо, в частности для таких соединений как  $NbN$ ,  $ZrN$ ,  $TiN$ . Соответственно, в левую часть выражения (7) введен коэффициент 2, указывающий на то, что поглощение одной молекулы реактивного газа приводит к образованию двух молекул соединения.

Изменение состава стенки происходит под действием трех процессов: молекулы реактивного газа вступают в соединение с находящимися на поверхности атомами металла; распыленные с мишени молекулы нитрида осаждаются на ту часть поверхности, которая занята атомами металла; распыленные с мишени атомы металла осаждаются на ту часть поверхности, которая занята молекулами соединения. В этом случае уравнение баланса для поверхности стенки может быть записано следующим образом:

$$2\alpha_{sm}F_a(1-\theta_s) + 2\alpha_{sn}F_a\theta_s + (j_t/e)Y_M(1-\theta_t)(S_t/S_s)\theta_s \quad (1.8)$$

$Y_M$  коэффициент распыления металла с поверхности мишени,  $\alpha_{sm}$  – вероятность прилипания реактивного газа к части  $(1-\theta_s)$  поверхности  $S_s$ ,  $\alpha_{sn}$  – вероятность прилипания реактивного газа к части  $(\theta_s)$  поверхности  $S_s$ . Коэффициент распыления металла, в том числе и кремния, зависит от напряжения распыления и лежит в пределах 0,3-1,0. Коэффициент распыления соединения всегда значительно ниже и для нитридов лежит в пределах 0,03-0,1.

Общую скорость распыления  $R$  мишени можно записать как сумму скоростей распыления молекул соединения  $R_R$  и атомов металла  $R_M$ :

$$R = R_R + R_M = (j_t S_t / e)[Y_R \theta_t + Y_M (1 - \theta_t)] \quad (1.9)$$

Таким образом, выражения (1) - (9) образуют замкнутую систему уравнений, позволяющую определять значения  $\theta_t$  и  $\theta_s$  для распылительной системы:

$$\theta_t = k_2 k_3 \pm [k_2 k_3^2 - 2k_3 \alpha_{im} Y_M]^{1/2} \quad (1.10)$$

Где

$$k_2 = Y_M (\alpha_{im} - \alpha_m) + (Y_R / 2)(R / F_a) + \alpha_{im} (Y_M - Y_R) \quad (1.11)$$

$$k_3 = \frac{1}{[2(\alpha_{tm} - \alpha_m)(Y_M - Y_R)]} \quad (1.12)$$

$$\theta_s = \frac{2\alpha_{sm}(F_a / R) + Y_R\theta_t + Y_M(1 - \theta_t)}{S_t / S_s + 2(F_a / R)(\alpha_{sm} - \alpha_{sn})} \quad (1.13)$$

Анализ выражений показывает, что если отношение поддерживается постоянным, то  $\theta_t = const$  и  $\theta_s = const$ . Величина  $\theta_s$  определяет часть поверхности подложки  $S_s$ , которая покрыта соединением. Величина  $(1 - \theta_s)$  определяет часть подложки, которая покрыта чистым металлом. Ясно, что величина  $\theta_s$  должна коррелировать с составом нанесенной пленки. Фактически состав нанесенной пленки может быть записан как  $Me R_x$ , где  $x = \theta_s$ .

Характер взаимодействия различных металлов и газов хорошо изучен. С кислородом все металлы интенсивно взаимодействуют без дополнительной ионизации, а с азотом только часть металлов. Остальные металлы взаимодействуют только с активированным (ионизированным) азотом. Это значит, что при построении модели должно учитываться действие ионов реактивного газа, а не его молекул [15].

В основе модели Берга лежит учет удельного потока атомов реактивного газа в виде нейтральных молекул к мишени и подложке. Он пропорционален парциальному давлению реактивного газа в камере  $P_R$  и определяется выражением  $n_g = GP_R$ , где  $G$  - коэффициент пропорциональности, учитывающий двухатомность молекулы реактивного газа. Это неверно в случае синтеза нитридов кремния или алюминия, при котором взаимодействие материала мишени осуществляется только с ионизированными молекулами азота. Именно для этого случая необходима новая модель, пригодная для таких пар металл-газ, в которых для реакции между ними необходима ионизация молекул газа.

## 1.5 Модель Деплы

Модель Деплы описывает процесс реактивного магнетронного распыления [16,17]. Данная модель в дополнение к подходу Берга учитывает

процессы ионной имплантации и переосаждения. Переосаждением называется процесс, когда распыленный материал осаждается обратно на мишень.

В модели Деплы отдельно рассматриваются вакуумная камера, мишень и поверхность подложки. За исключением вакуумной камеры, эти объекты далее подразделяются на несколько поверхностных ячеек. Кроме того, модель может описывать процесс реактивного напыления в зависимости от времени.

Модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для камеры, мишени и поверхности подложки, а также уравнениями в частных производных первого порядка, описывающими приповерхностную область. Эта область также разбивается на несколько ячеек. Уравнения описывают баланс потоков различных атомов и соединений в каждой ячейке каждого рассмотренного объекта. Поскольку система уравнений для мишени, разбитой на несколько ячеек, становится сильно нелинейной, то аналитическое решение в большинстве случаев получить невозможно. Поэтому для решения стационарной задачи производные по времени прораниваются к нулю и численно решается та же система, что и в нестационарном случае.

### 1.5.1 Вакуумная камера

Вакуумная камера описывается пространственно усредненными величинами. Камера содержит частично ионизированные инертные (например, Ar) и реактивные (например, O<sub>2</sub>) газы. Вакуумная насосная система характеризуется постоянным объемным расходом или скоростью откачки  $S$  (в см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>), которая определяет скорость удаления газа из камеры. Газы в камере находятся при низком давлении (0,01 – 1 Па), поэтому их температура  $T$ , объем  $V$ , давление  $p$  и концентрация  $n$  определяются уравнением состояния идеального газа:

$$PV = nk_B T \quad (1.14)$$

где,  $k_B$  - постоянная Больцмана.

Идеальные газы занимают объем  $V$ , соответствующий объему вакуумной камеры. температура  $T$  считается равной для всех газов и постоянной в течение всего процесса. Для инертного газа его давление  $P_i$  и концентрация  $n_i$  не зависят от времени, а для реактивного газа – зависят. Дифференцируя по времени уравнение (1) для реактивного газа, получаем:

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{k_b T}{V} \frac{dn_r}{dt} \quad (1.15)$$

Это выражение описывает изменение давления за счет добавления или удаления частиц газа из камеры. Скорость изменения концентрации газа или поток газа ( $= dn / dt$ ) дается следующей формулой

$$Q_r = Q_{in} - Q_p - Q_t \quad (1.16)$$

Здесь,  $Q_{in}$  - поток реактивного газа, вводимого в камеру с помощью контроллера массового расхода. Реактивный газ может удаляться из объема камеры тремя путями: под действием насосной системы  $Q_p$ , вследствие реакции с поверхностью подложки  $Q_s$  или реакции с мишенью  $Q_t$ . Поток газа удаляемого насосной системой определяется скоростью откачки [18]:

$$Q_p = \frac{p_r S}{k_b T} \quad (1.17)$$

Поток частиц реактивного газа  $F$  к границам камеры (например, мишень и подложка) пропорционален давлению реактивного газа [19].

$$F = \frac{P_r}{\sqrt{2\pi m_r k_b T}} \quad (1.18)$$

Здесь газ предполагается идеальным,  $m_r$  – масса частицы реактивного газа, а  $F$  измеряется в частицах на  $m^2$  и секунду.

В потоке магнетронной плазмы часть частиц инертного и реактивного газа ионизируется. Эти доли ионизации можно рассчитать с помощью множества различных моделей плазмы.

В этой модели предполагается, что доля ионов реактивного газа  $f$  пропорциональна доле реактивного газа, которая, учитывая уравнение (1.14), определяется формулой:



$$f = \frac{P_r}{P_i + P_r} \quad (1.19)$$

Модель предполагает, что катод (мишень) бомбардируется этой долей реактивных ионов по сравнению с ионами инертного газа.

### 1.5.2 Мишень

Мишень образует одну из границ вакуумной камеры. Она состоит из чистого металла и выступает в роли катода в системе напыления. Мишень разделена на поверхностную и приповерхностную области, а каждая область разделена в свою очередь на ячейки. Состояние каждой поверхностной ячейки описывается следующими величинами: долей поверхности покрытой металлом  $\theta_m$ ; долей поверхности покрытой хемисорбированными атомами реактивного газа  $\theta_c$  и долей поверхности покрытой соединением  $\theta_r$  [20].

Доля  $\theta_m$  представляет собой металлическую (непрореагировавшую) часть поверхностной ячейки, тогда как доли  $\theta_c$  и  $\theta_r$  представляют собой участки поверхностной ячейки, где металл так или иначе про взаимодействовал с атомами реактивного газа. Для долей  $\theta_r$  и  $\theta_c$  предполагается один и тот же коэффициент стехиометрии  $z$ . Различие между  $\theta_r$  и  $\theta_c$  может быть важным, поскольку, например, слой кислорода, хемосорбированного на поверхности алюминия и слой оксида по-разному влияют на выход электронной эмиссии [21].

В модели учитываются следующие процессы, которые изменяют состояние поверхностной ячейки мишени:

- 1) Распыление поверхности путем бомбардировки ионами, которая удаляет материал с поверхности мишени и открывает лежащий глубже материал.
- 2) Хемосорбция молекул реактивного газа.
- 3) Процесс переосаждения.

### 1.5.3 Поверхность мишени

Во-первых, средний коэффициент распыления  $Y_{av}$  может быть задан для каждой поверхностной ячейки в виде

$$Y_{av} = Y_m \theta_m + Y_c \theta_c + Y_r \theta_r \quad (1.20)$$

Во-вторых, для каждой ячейки могут быть определены потоки переосажденных металла  $F_m$  и соединения  $F_r$  на поверхность ячейки площадью  $A_t$ :

$$F_m = \varepsilon_t \frac{I_{tot}}{A_t} Y_m \bar{\theta}_m \quad (1.21)$$

$$F_r = \varepsilon_t \frac{I_{tot}}{A_t} (Y_r \bar{\theta}_r + Y_c \bar{\theta}_c) \quad (1.22)$$

Для частиц соединения  $\theta_b$  в приповерхностной ячейке непосредственно под соответствующей поверхностной ячейкой связана с концентрацией металлических частиц [22,23]

$$\theta_b = 1 - \frac{n_M(0)}{n_0} \quad (1.23)$$

Здесь,  $n_M(0)$  - концентрация частиц металла в граничной приповерхностной ячейке,  $n_0$  - начальная концентрация частиц металла.

Уравнения для  $\theta_m$ ,  $\theta_c$  и  $\theta_r$  можно записать следующим образом:

$$n_{0,s} \frac{d\theta_m}{dt} = jY_{av}(1 - \theta_b) - jY_m \theta_m - (F_m + F_r)\theta_m + F_m \quad (1.24)$$

$$n_{0,s} \frac{d\theta_r}{dt} = jY_{av}\theta_b - jY_r \theta_r - (F_m + F_r)\theta_r + F_r \quad (1.25)$$

$$n_{0,s} \frac{d\theta_c}{dt} = -jY_c \theta_c - (F_m + F_r)\theta_c + j\frac{\beta}{z}\theta_c + F\frac{2}{z}\alpha_t \theta_m \quad (1.26)$$

Доля металла увеличивается за счет удаления поверхностного материала. Это первое слагаемое в уравнении (1.24) и обозначается на рисунке 1.6 (а) как сумма трех входящих стрелок в верхней части каждого блока. Второй член уравнения (1.24) представляет собой распыление металла в камере, который уменьшает долю металла. Третий член уравнения (1.24) представляет собой за счет переосаждения перенос поверхностного металла в приповерхностный слой, что привело к уменьшению доли металла в поверхности мишени. Четвёртый член это прирост металла за счет переосаждения. Пятый член представляет собой вбивания реактивных атомом в приповерхностный слой превращая хемосорбированные частицы в частицы металла. Шестой член уравнения (1.25) представляет собой хемосорбцию реактивного газа на поверхности металла, преобразовывая его в хемосорбированные частицы, таким образом уменьшая долю металла. Доля соединения  $\theta_r$  (уравнение (1.25)) увеличивается за счет распыления поверхностных частиц, (первый член уравнения (1.25)).

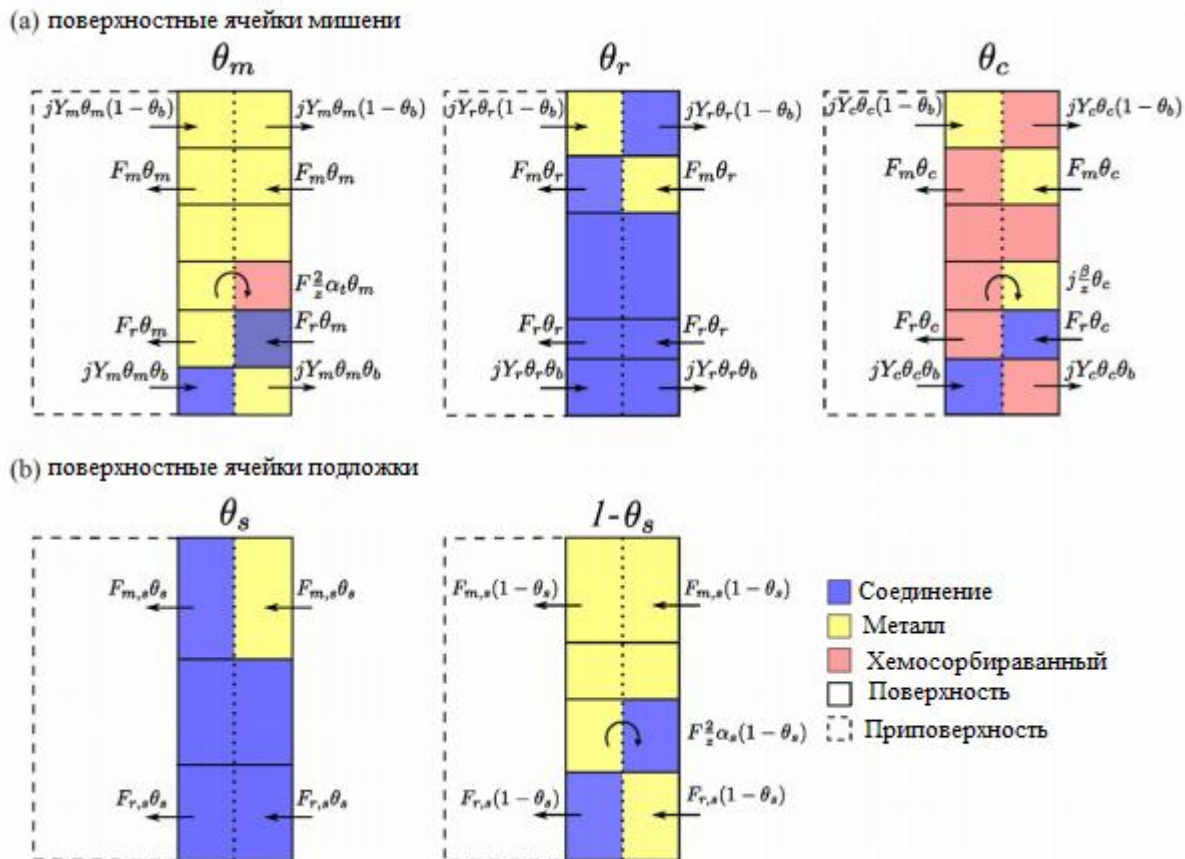


Рисунок 1.6 – Схематическое изображение моделирования поверхностная ячейка мишени Три цветных блока представляют собой, три доли частиц  $\theta_m$  (желтый),  $\theta_r$  (синий) и  $\theta_s$  (красный) для одной поверхностной ячейки. Бесцветный штриховой контур, прикрепленный к каждому блоку, представляет собой граничную ячейку приповерхностного слоя

Эта приповерхностная ячейка задается долей частиц  $\theta_b$  (без цвета). Второй член 25 уравнения — это снижения доли соединения из-за распыленных частиц. Третий член 25 уравнения это переосаждения частиц вследствие этого увеличивает долю соединения на поверхности. Четвёртый член представляет собой рост переосажденных частиц. Доля хемосорбции  $\theta_s$  (уравнение (26) увеличивается только за счет хемосорбции реактивного газа с частицами металла (четвертый член в уравнении (1.26)). За счет распыления уменьшается доля хемосорбированных частиц (первый член 1.26 уравнения). За счет переосаждения доля хемосорбированных частиц увеличивается (второй член 1.26 ур.).

#### 1.5.4 Приповерхностный слой мишени

Приповерхностный участок каждой поверхностной ячейки разделяется путем разбиения его на приповерхностные (или объемные) ячейки. Приповерхностная ячейка определяет концентрацию имплантированных реактивных атомов  $n_R$  и частиц металла  $n_M$  на определенной глубине в мишени. Концентрации  $n_M$  и  $n_R$  имеют пространственную (= глубину) и временную зависимость и описываются двумя связанными уравнениями с частными производными как:

$$\frac{\partial n_M}{\partial t} = v_s \frac{\partial n_M}{\partial x} - k n_M n_R \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial n_R}{\partial t} = v_s \frac{\partial n_R}{\partial x} - zkn_M n_R + j(2f + \beta\theta_c) p(x) s(n_M, n_R) \quad (1.28)$$

Эффективная поверхностная скорость  $v_s$  ячейки мишени:

$$v_s = v_e - v_r \quad (1.29)$$

Где скорость эрозии  $v_e$  и скорость повторного осаждения  $v_r$  равны  
Учитывая как

$$v_e = \frac{j}{n_0} (Y_m \theta_m + Y_c \theta_c + Y_r \theta_r) \quad (1.30)$$

$$v_r = \varepsilon_t \frac{I_{tot}}{n_0 A_t} (Y_m \bar{\theta}_m + Y_c \bar{\theta}_c + Y_r \bar{\theta}_r) \quad (1.31)$$

Скорость эрозии зависит только от локального состояния ячейки клетки и ее локальной плотности ионного тока  $j$ . Однако скорость повторного осаждения  $v_r$  определяется средним состоянием мишени.

Потребление реактивного газа  $q_t$  ячейки мишени определяется как:

$$q_t = \begin{cases} \alpha_t F \theta_m A_t + fj A_t - q_d - v_{s2}^{n_R(0)} A_t & v_s > 0 \\ \alpha_t F \theta_m A_t + fj A_t - q_d & v_s < 0 \end{cases} \quad (1.32)$$

### 1.5.5 Подложка

Подложка - это другая граница, которая окружает вакуумную камеру. Описание подложки двумерно в пространстве, так как рассматривается только эволюция на поверхности. Эта двухмерность принимается для учета неоднородного профиля осаждения напылённого материала. Он так же моделируется как поверхность мишени, разделяя подложку на поверхностные

ячейки. Состояние каждой поверхностной ячейки характеризуется локальной долей частиц, которая представляет собой долю составных частиц.

Поверхностное состояние ячейки подложки изменяется следующими процессами, которые учитываются в модели:

(1) Хемосорбция реактивного газа с частицами поверхностных металлов, превращение их в составные частицы

(2) Осаждение напылённого соединения и металлических частиц, эффективно транспортируя нижележащий материал глубже в слой

Состояние ячейки подложки определяется ее соответствующим ОДУ, которая определяет временную зависимость доли [24,25].

$$n_{0,s} \frac{d\theta_s}{dt} = F_{r,s}(1-\theta_s) - F_{m,s}\theta_s + F \frac{2}{z} \alpha_s (1-\theta_s) \quad (1.33)$$

Подобно тому, как для ячейки-мишени, можно определить расход реактивного газа в ячейках для подложки. Он задается как:

$$q_s = \alpha_s F(1-\theta_s)A_s \quad (1.34)$$

Этот расход газа определяется исключительно процессом хемосорбции, который эффективно включает молекулы реактивного газа в осажденный слой.

## 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1 Описание установки УВН – 200МИ

Для получения плёнок  $TiO_2$  и  $TiN$  использовалось установка магнетронного осаждения — УВН-200МИ. Фотография данной установки представлена на рисунке 2.1

Параметры установки среднечастотного магнетронного напыления УВН-200МИ:

*Вакуумная камера:* диаметр – 380 мм, длина – 450 мм

*Напряжение на катоде:* 320 В

*Эффективная скорость откачки:* 75 л/с

*Мишень:* материал –  $Ti$

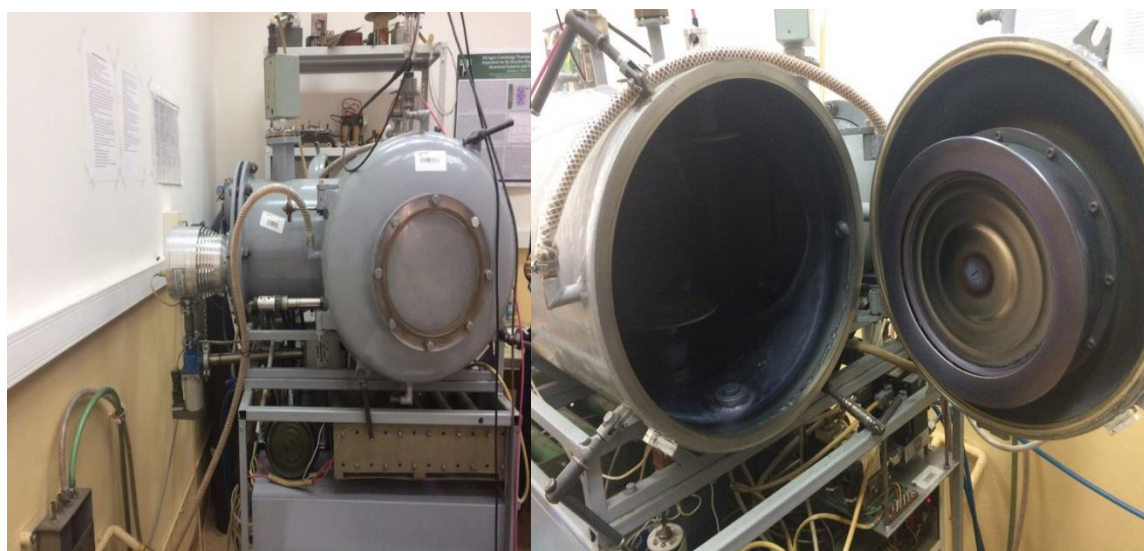


Рисунок 2.1 – Установка УВН-200МИ

Основной задачей установки является нанесение комплексных оксидных ( $TiO_2$ ) и оксинитридных ( $Ti-O-N$ ) покрытий на различные материалы, например изделия медицинского назначения, в частности на внутрисосудистые стенты. Блок схема установки импульсного магнетронного напыления представлена на рисунке 2.2. Установка состоит из следующих основных частей: цилиндрическая вакуумная камера с расположенным в ней магнетроном, высоковакуумная

система откачки, источник импульсного питания магнетрона, трехканальная система подачи газа, автоматизированная система управления установкой, включающая блок периферийных контроллеров, управляющий контроллер и персональный компьютер.

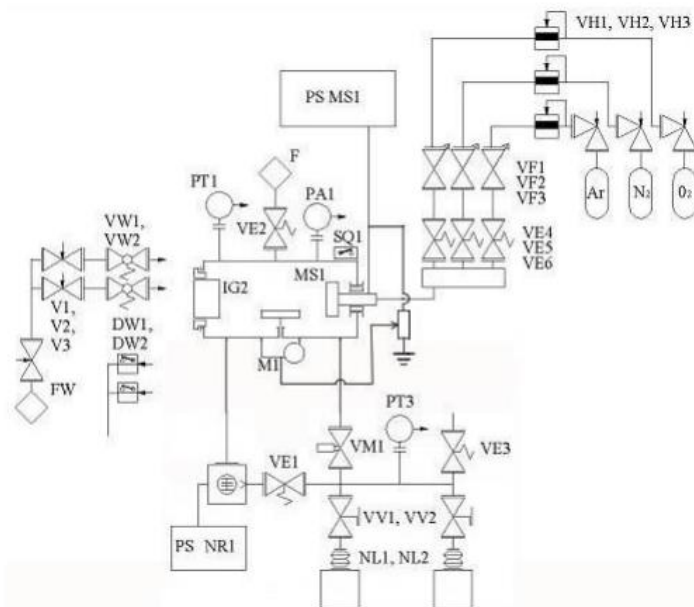


Рисунок 2.2 – Блок-схема установки УВН-200МИ

Вакуумная камера располагается горизонтально, размеры камеры составляют: диаметр – 380 мм, длина – 450 мм

Камера имеет двери на торцевых сторонах поверхности цилиндра и боковой отвод с фланцем, на котором смонтирован турбомолекулярный насос. На крышке бокового отвода камеры смонтирован датчик высокого вакуума ДВЭ-0/7-007. Внутри камеры расположен магнетрон и стол для образцов с приводом вращения и системой подачи отрицательного электрического смещения на стол.

Вакуумная система включает низковакуумную и высоковакуумную откачку. Высокий вакуум создается в два этапа: сначала двумя форвакуумными насосами 2НБР-5ДМ (NL1 и NL2) до давления 10Па, затем турбомолекулярным насосом ТМН-150 (NR1)

## 2.2 Алгоритм работы с программой RSD



Программа RSD2013 разработана для моделирования реактивного магнетронного распыления. Основное внимание уделено кривой гистерезиса процесса. В основе лежит модель, описанная в параграфе 1.5.

RSD2013 позволяет вычислять следующие величины:

- давление  $P_r$  реактивного газа в системе;
- доля соединения  $\theta_r$ , доля хемосорбированных частиц  $\theta_c$ , доля металла  $\theta_m$  на поверхности мишени;
- доля соединения  $\theta_s$  и доля металла на поверхностях подложки;
- расход  $Q_t$  реактивного газа на поверхности мишени;
- расход  $Q_s$  реактивного газа на подложке;
- количество реактивного газа  $Q_p$ , откачиваемого вакуумным насосом;
- количество реактивного газа  $Q_{in}$ , введенного в вакуумную камеру

Для вычисления, модели RSD2013 необходим набор входных данных. которые можно ввести на вкладках **Method, Chamber, Target, Substrate** и **Output**.

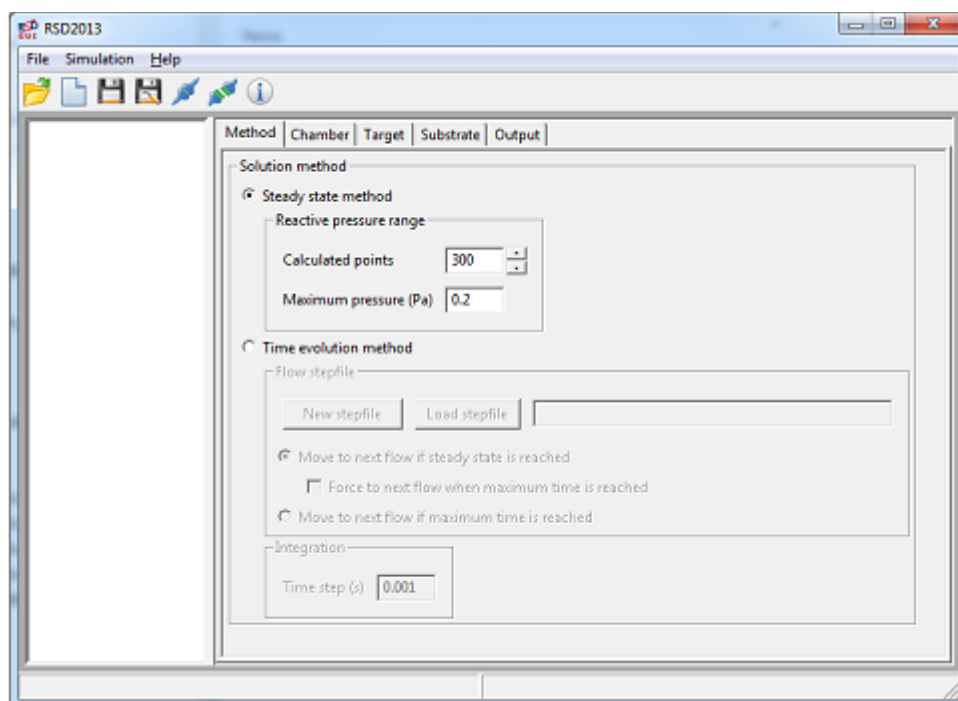


Рисунок 2.3 – Вкладка Method

Для того чтобы запустить моделирования сначала необходимы входные параметры. Выбрав «Файл»> «Сохранить как» в строке меню. Будут созданы два

входных файла, а именно: My\_first\_simulation.in и my\_first\_simulation\_OutputSpecs.in. Первый файл является основным входным файлом, а второй файл является указывающим результаты моделирования. Чтобы запустить моделирование с параметрами из этого входного файла, в строке меню нужно выбрать «Моделирование» -> «Выполнить». Если входные параметры программы были выбраны правильно, то откроется окно, показывающее ход моделирования, которое закрывается в конце моделирования.

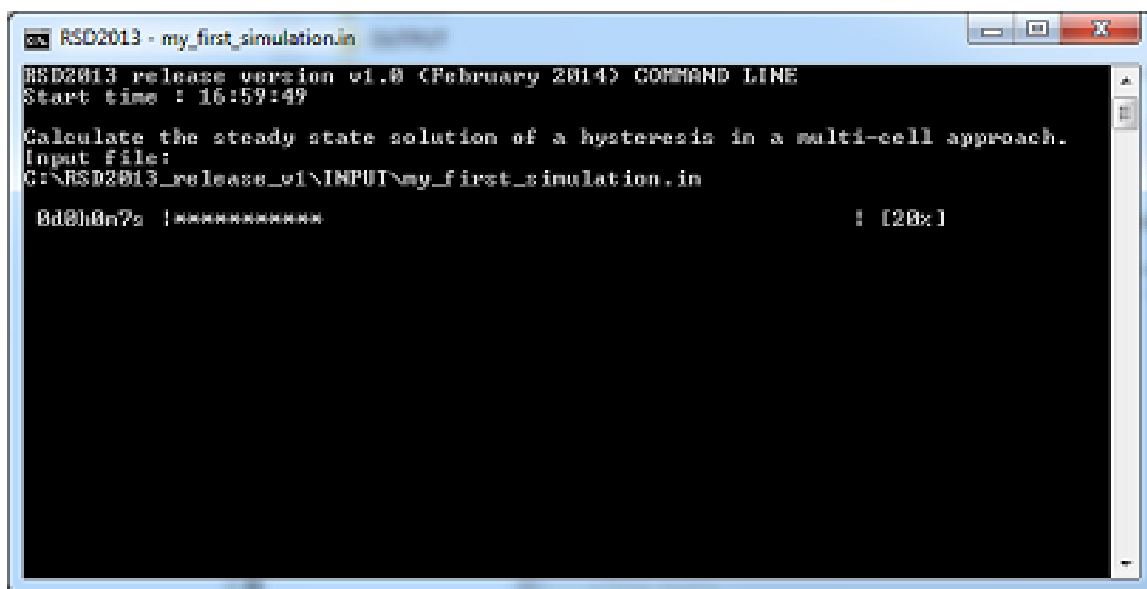


Рисунок 2.4 – Запуск моделирования

Результаты моделирования сохраняются в выходных файлах. Чтобы проверить это нужно перейти на вкладку Window Output. По умолчанию местом сохранения выходных файлов является папка программы RSD. В проводнике Windows есть два выходных файла, summary.out и hyst\_steady.out, Первый файл обновляется во время прогона моделирования и показывает ход моделирования, который задается в окне команд. В конце моделирования он дает затраченное время для этого прогона моделирования и его времени окончания. Второй файл, заканчивающийся на hyst\_steady.out, содержит результаты моделирования. Если моделирование стационарном режиме давление реактивного газа увеличивается

до значения 0,2. Общее число значений давления, которые рассчитываются по умолчанию 300. Внизу указаны выходные параметры:

1.  $Q_{in}$ : поток реактивного газа, вводимого в вакуумную камеру
2.  $P_{O2}$ : давление реактивного газа
3.  $\theta_s$ : пространственно-усредненная доля соединения на поверхности подложки
4.  $\theta_M$ : пространственно-усредненная доля металла на поверхности мишени
5.  $\theta_c$ : пространственно усредненная хемосорбированная доля на поверхности мишени
6.  $\theta_R$ : пространственно-усредненная доля соединений на поверхности мишени
7.  $\theta_{mb}$ : пространственно-усредненная доля металла приповерхностного слоя мишени
8.  $Q_p$ : поток реактивного газа, откачанный вакуумным насосом
9.  $Q_s$ : расход реактивного газа, потребляемый при образовании соединения на подложке
10.  $Q_t$ : расход реактивного газа, потребляемый (или высвобождаемый) мишенью

$Q_{in}[\text{sccm}]$	$P_{O_2}[\text{Pa}]$	$\theta_{beta_s}$	$\theta_{beta_M}$	$\theta_{beta_c}$	$\theta_{beta_R}$	$\theta_{beta_{mb}}$	$Q_p[\text{sccm}]$	$Q_s[\text{sccm}]$	$Q_t[\text{sccm}]$
0.0250164	4.0004e-005	0.0091003	0.999331	0.000230529	0.000410722	0.999998	0.00107637	0.0237574	0.00010259
0.48701	0.000950703	0.179244	0.984456	0.00574236	0.00950206	0.999006	0.0250442	0.457725	0.00424071
0.819501	0.00182354	0.305521	0.949546	0.0110919	0.0193617	0.998009	0.049119	0.762079	0.00830302
1.06950	0.0027243	0.397781	0.954399	0.0162975	0.0291034	0.996946	0.0753014	0.983354	0.0123707
1.26221	0.00362705	0.47156	0.959409	0.0213575	0.0390337	0.995872	0.0973923	1.14817	0.0164431
1.41139	0.00453393	0.53141	0.964371	0.02627	0.0491193	0.994734	0.121992	1.37287	0.0203274
1.52913	0.00544483	0.58032	0.96946	0.0310331	0.0594871	0.993523	0.146502	1.548	0.0246194
1.64037	0.00635939	0.622034	0.974321	0.0354444	0.0700244	0.99224	0.171123	1.64072	0.0287227
1.72472	0.00727907	0.657103	0.979119	0.0401023	0.0807734	0.990922	0.195833	1.69402	0.0328237
1.79417	0.00820242	0.687248	0.983829	0.0444032	0.0917374	0.989327	0.220499	1.7373	0.0368992
1.83439	0.00912994	0.713499	0.988484	0.0484444	0.102499	0.987682	0.245436	1.76732	0.0411483
1.90493	0.0100617	0.736923	0.99303	0.0523279	0.114422	0.98602	0.270727	1.78397	0.0452324
1.9478	0.0109978	0.756933	0.917346	0.0563321	0.126322	0.984323	0.293912	1.80222	0.04947
1.98403	0.0119331	0.77311	0.801433	0.0599746	0.13837	0.982634	0.321212	1.80913	0.0536811
2.01314	0.0128827	0.78444	0.783441	0.0634434	0.150713	0.98103	0.346629	1.81082	0.0579187

Рисунок 2.5 – Пример выходного файла

Таблица 2.1– Входные параметры RSD2013

Параметр	Описание
$Y_m, Y_c, Y_r$	Коэффициент распыления частиц металла, соединения и хемосорбированных частиц
$\alpha_t, \alpha_s$	Коэффициент прилипания на мишени и на подложке
$k$ (см <sup>3</sup> с <sup>-1</sup> )	Коэффициент скорости реакции имплантированных реактивных атомов с частицами металлов
$\beta$ (ион <sup>-1</sup> )	Кнопк-он коэффициент хемосорбированных реактивных атомом
$n_0$ (см <sup>-3</sup> )	Плотность частиц
$n_{0,s}$ (см <sup>-2</sup> )	Плотность поверхности частиц
$z$	Стехиометрия
$I_{tot}$ (ион с <sup>-1</sup> )	Ионный ток
$P_i$ (Па)	Давление инертного газа
$S$ (см <sup>3</sup> с <sup>-1</sup> )	Скорость откачки

В програму RSD2013 заложено два модели: стационарная и нестационарная.

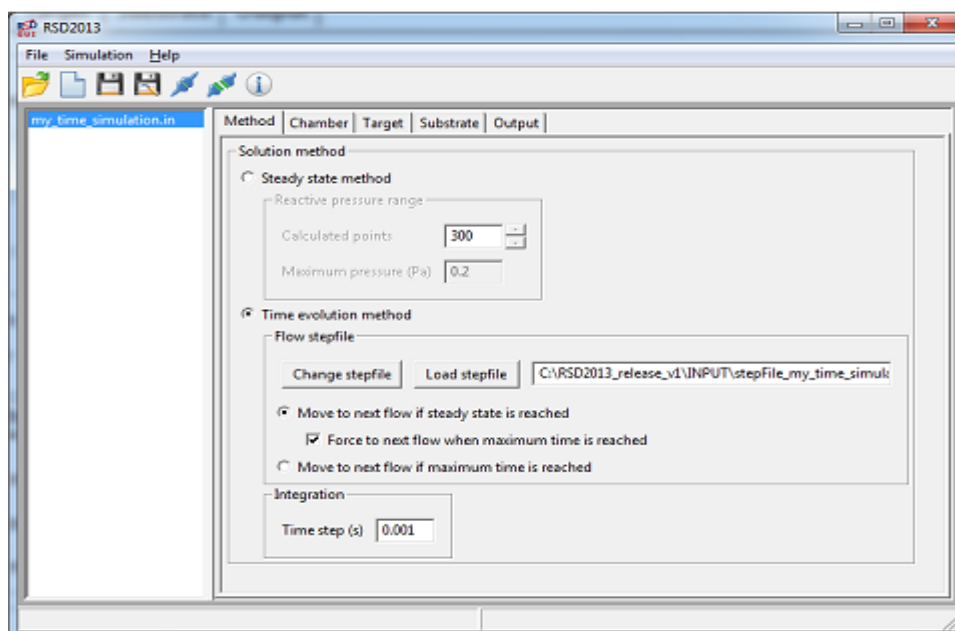


Рисунок 2.6 – Вкладка «Режим окна»

Согласно стационарной модели давление  $P_r$  ступенчато увеличивается до максимального значения и затем уменьшается.

В нестационарной модели состояние реактивной магнетронной системы зависит от времени. Временная зависимость потока  $Q_{in}$  реактивного газа определяется шаговым файлом. Шаговый файл является одним из входных файлов.

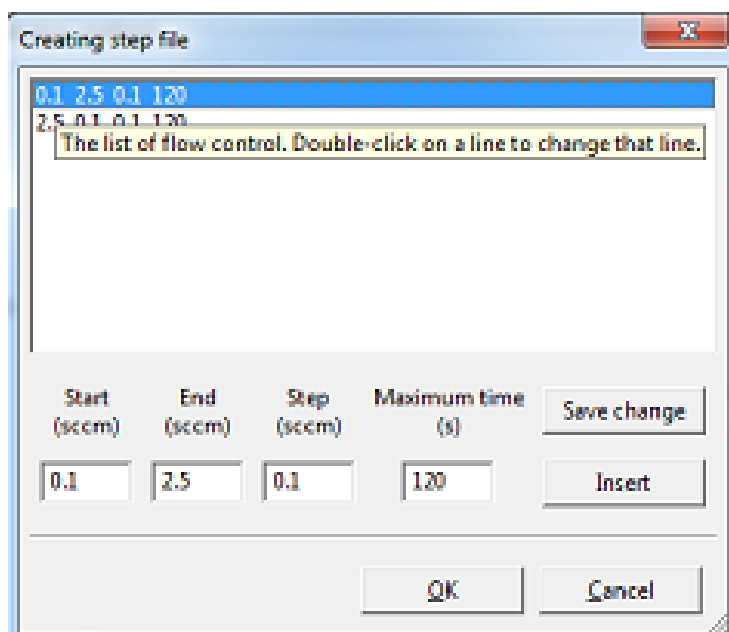


Рисунок 2.7 – Создание шагового файла

В программе RSD есть отдельное окно для моделирования параметров вакуумной камеры. Здесь задается температура в камере, давление рабочего газа аргона и молярная масса реактивного газа. А также задается условные параметры ток иона, эффективная скорость откачки и объем камеры.

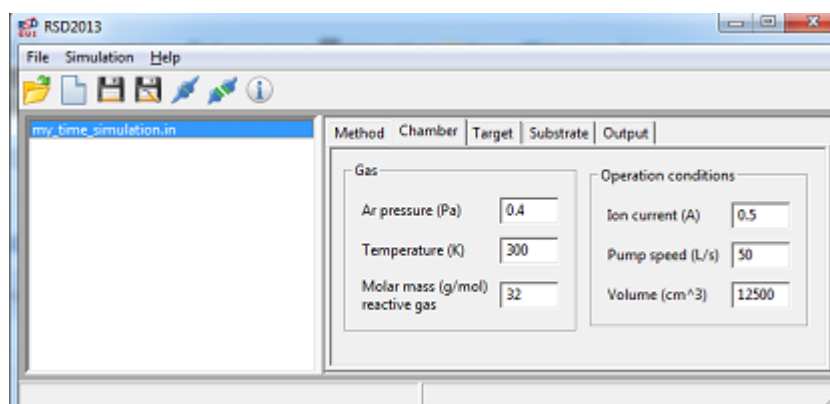


Рисунок 2.8 – Окно «Вакуумная камера»

### 3. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана при разных значениях тока

**Напряжение:** 320 В

**Сила тока:**

при мощности 1 кВт  $I \approx 3$  А

при мощности 0,3 кВт  $I \approx 1$  А

**Скорость откачки:** 150 л/с

**Давление:** 0,1 – 0,4 Па. Типично – 0,2 Па.

Коэффициент распыления  $Y_{Ti} = 0.12$

Коэффициент распыления  $Y_{TiO_2} = 0.028$

В процессе работы был исследован зависимость гистерезиса для  $TiO_2$  при различных значениях тока. По данным которые были получены с помощью программы RSD2013, построена зависимость расхода реактивного газа от парциального давления, показанная рисунке 3.1.

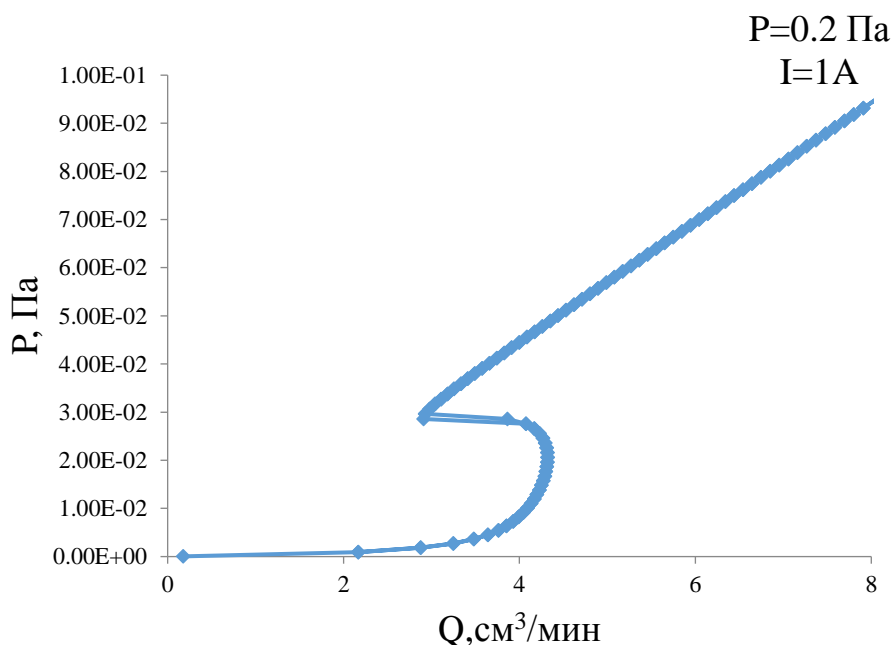


Рисунок 3.1 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления

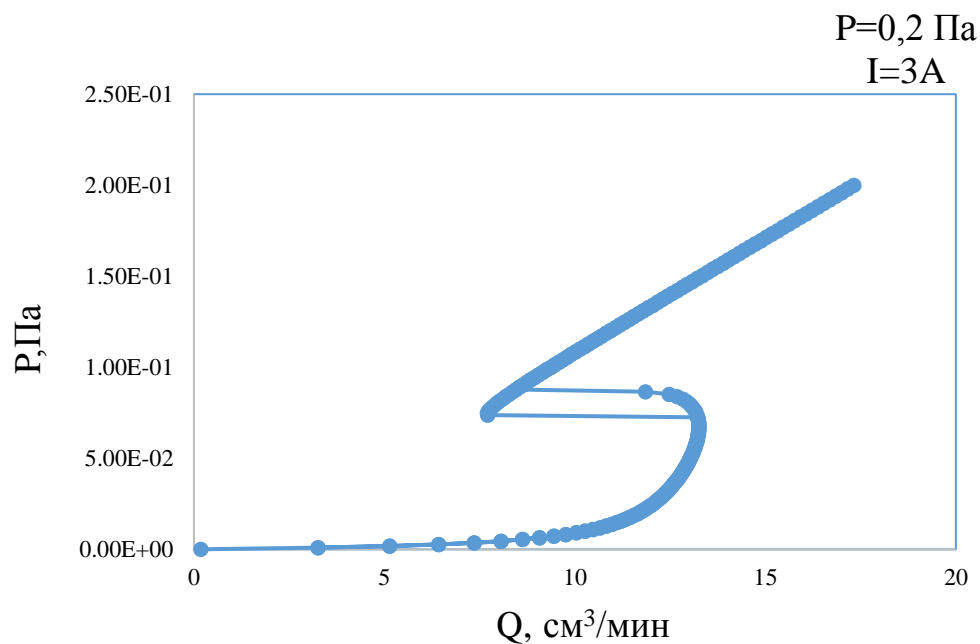


Рисунок 3.2 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления

Из графиков можно сделать вывод что, чем больше величина тока, тем больше потребление реактивного газа и область гистерезиса смещается в область более высоких значений расхода. Переходная область из металлического в отравленный режим происходит в разных значениях расхода.

### 3.2 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от мощности

С помощью программы RSD проведены расчёты и построены зависимости от расхода реактивного газа парциального давления реактивного газа в следующих режимах:

Мощность, Вт: 300, 500, 800, 1000

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>) варьировалось, Па: 0 – 0,4

Коэффициент распыления  $Y_{\text{Ti}} = 0.12$

Коэффициент распыления  $Y_{\text{TiO}_2} = 0.028$

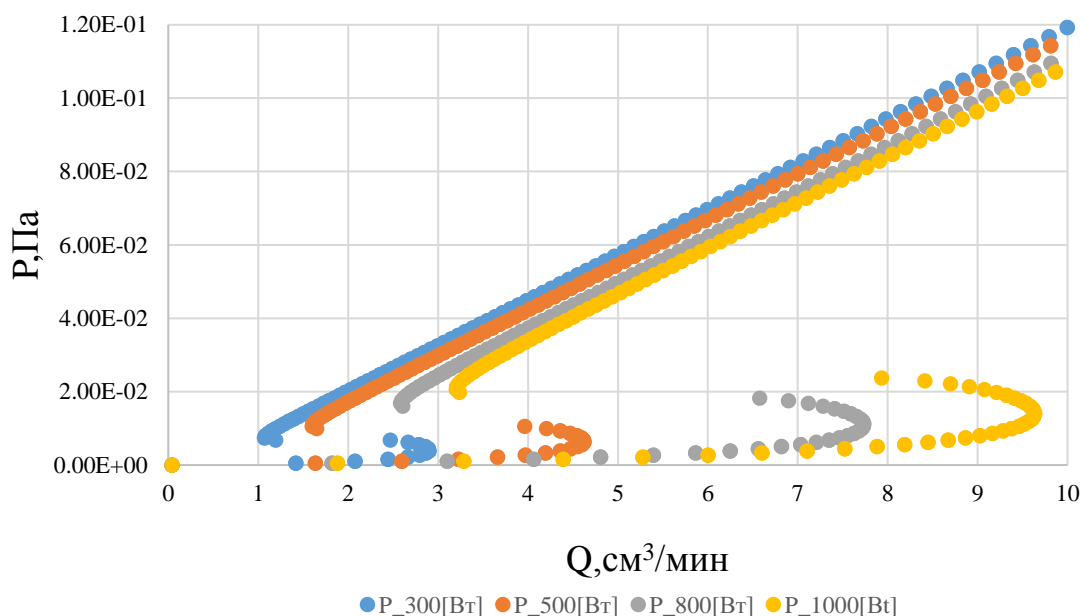


Рисунок 3.3 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях мощности

С увеличением мощности расход реактивного газа увеличивается, и область гистерезиса соответственно тоже увеличивается, и уходит в более высокие значения расхода. Это объясняется тем, что если чем больше мощность, тем больше распыляется титан и таким образом, потребление реактивного газа становится больше. По графику определена область гистерезиса. Положение области гистерезиса в зависимости от мощности приведено в таблице 3.1

Таблица 3.1 Область гистерезиса в зависимости от мощности

Мощность, Вт	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
300	1-3
500	1,6- 4,7
800	3 - 7,7
1000	3,2 – 9,6

### 3.3 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от давления рабочего газа



С помощью программы RSD проведены расчёты и построены зависимости от расхода реактивного газа парциального давления реактивного газа в следующих режимах:

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

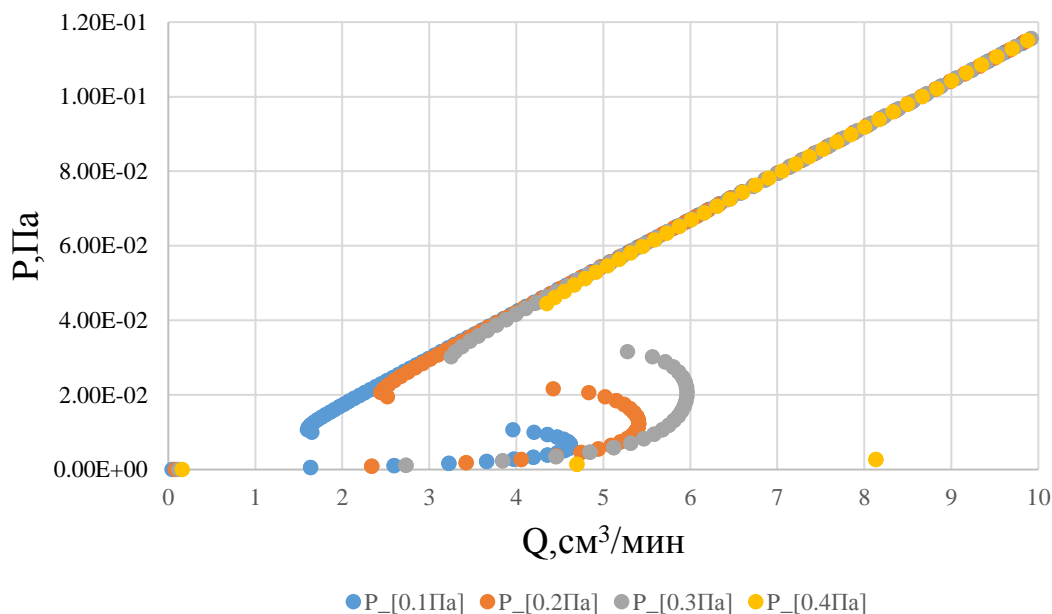


Рисунок 3.4 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях рабочего давления газа

Из рисунка 3.4 сделать вывод что, с увеличением давления рабочего газа область гистерезиса также увеличивается и уходит в более высокие значения расхода. По графику определена область гистерезиса при разных давлениях рабочего газа. Положение области гистерезиса в зависимости от давления приведена в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Область гистерезиса в зависимости от давления

Рабочий газ , Па	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
0,1	1,6-4,7
0,2	2,3-5,4
0,3	3,2-5,9

### 3.4 Исследование зависимости процесса оксида титана от скорости химической реакции в приповерхностном слое

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

Скорость химической реакции (Bulk reaction rate),  $10^{-23}$  см<sup>3</sup>/с: 1, 2, 3, 4, 5.

Скорость откачки: 150 л/с

Скорость химической реакции (Bulk reaction rate) - определяет скорость реакции, с которой имплантированные атомы реактивного газа реагируют с атомами металла.

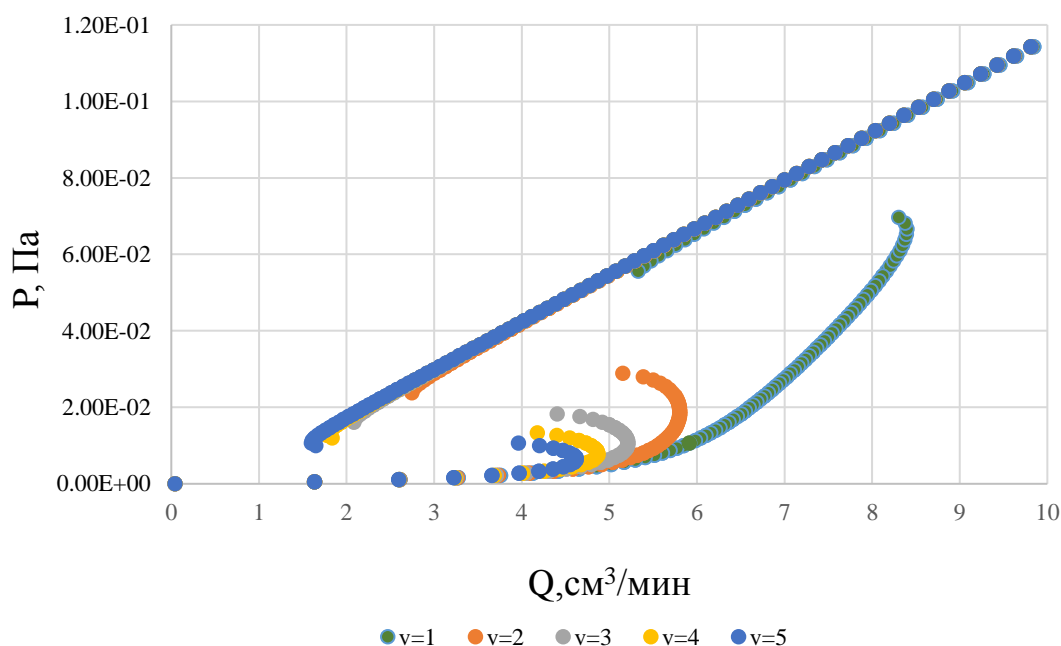


Рисунок 3.5 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях скорости химической реакции [ $10^{-23}$  см<sup>3</sup>/с]

В случае оксида титана при увеличении скорости реакции, область гистерезиса уменьшается и уходит более высокие значения расхода. Положение области гистерезиса в зависимости от скорости реакции приведено в таблице 3.3

Таблица 3.3 Область гистерезиса от скорости реакции.

Скорость химической реакции, $10^{-23}$ см <sup>3</sup> /с	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
1	5,3-8,3
2	2,7-5,6
3	2,2-5,3
4	1,8-4,8
5	1,6-4,7

### 3.5 Исследование зависимости гистерезиса оксида титана от коэффициента прилипания

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>): 0,4 Па

Коэффициент прилипания: 0.1; 0.01; 0.5; 1.

Скорость откачки: 150л/с

Коэффициент прилипания — это средняя вероятность того, что частица реактивного газа после столкновения с металлической поверхностью останется на ней.

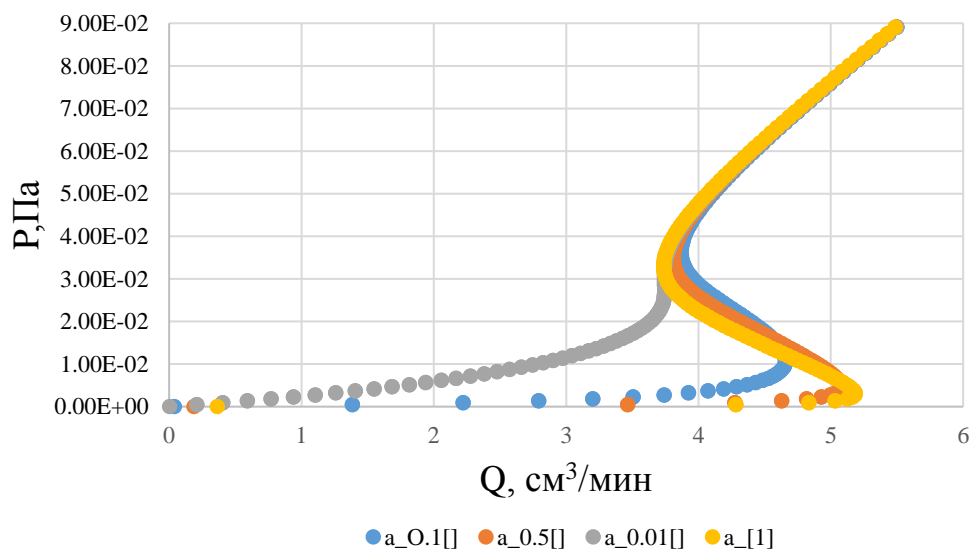


Рисунок 3.6 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях коэффициента прилипания

При исследовании зависимости от коэффициента прилипания, выявлено значительное влияние на гистерезис. В случае оксида титана, при увеличении коэффициента прилипания область гистерезиса увеличивается, при малых значениях коэффициента петля гистерезиса уменьшается.

### 3.6 Исследование зависимости гистерезиса нитрида титана от мощности

С помощью программы RSD проведены расчеты и построены зависимости от расхода реактивного газа парциального давления реактивного газа в следующих режимах:

Мощность, Вт: 300, 500, 800, 1000

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

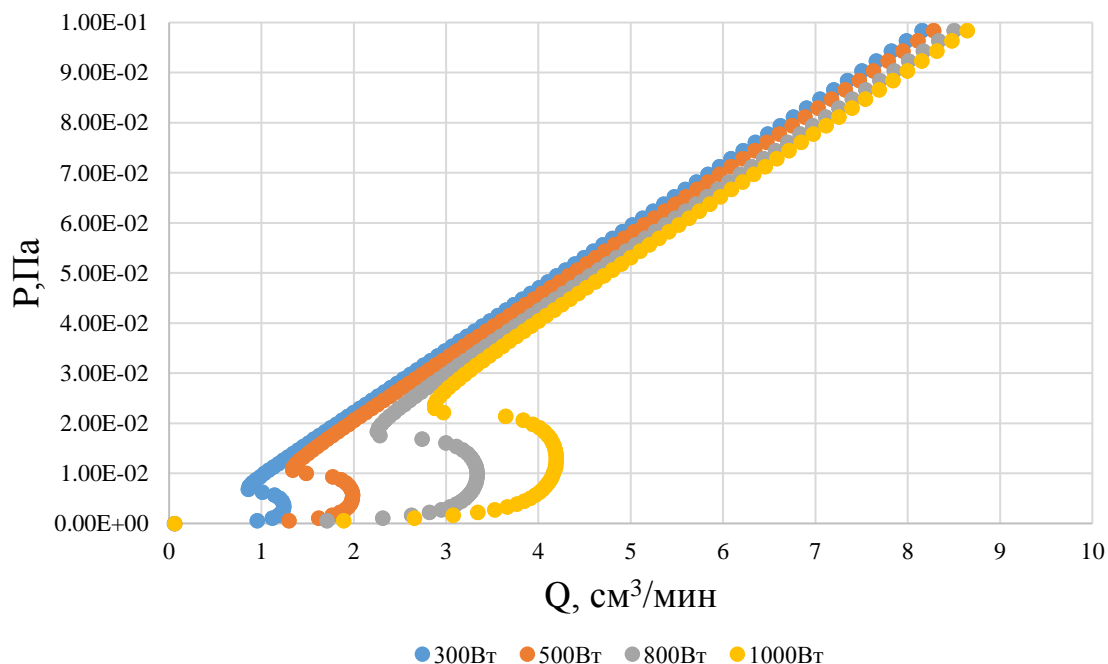


Рисунок 3.7 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях мощности

Как и в случае оксида титана у нитрида титана также уходит в область более высоких значений реактивного газа. Внизу в таблице указан область гистерезиса.

Таблица 3.4 – Область гистерезиса для нитрида титана

Мощность, Вт	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
300	0.8-1.24
500	1.34-1.97
800	2.28-3.33
1000	2.97-4.19

### 3.7 Исследование зависимости гистерезиса от давления рабочего газа для нитрида титана

Давления рабочего газа

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

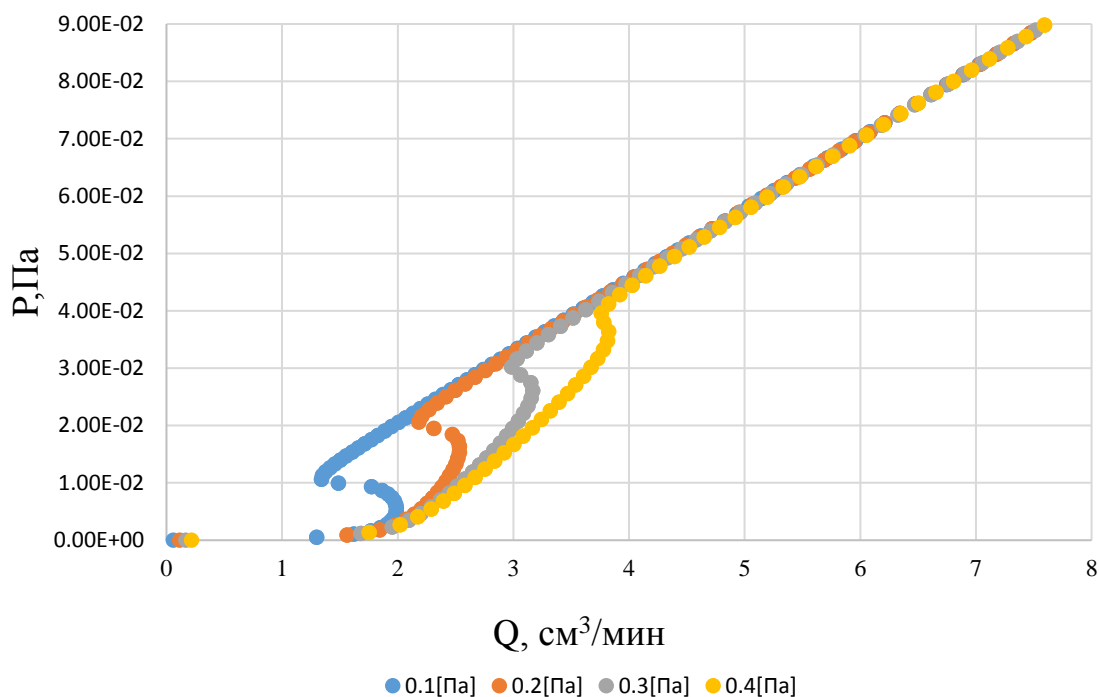


Рисунок 3.8 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях давления рабочего газа

При исследовании зависимости от давления рабочего газа, для нитрида титана область гистерезиса уменьшается. Внизу в таблице указаны область гистерезиса.

Таблица 3.5 – Область гистерезиса при разных значениях рабочего газа

Рабочий газ , Па	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
0,1	1.34-1.98
0,2	2.31-2.53
0,3	2.98-3.1
0,4	3.78-3.81

### 3.8 Исследование зависимость гистерезиса нитрида титана от скорости химической реакции в приповерхностном слое

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

Скорость химической реакции (Bulk reaction rate), 10<sup>-23</sup> см<sup>3</sup>/с: 1, 2, 3, 4, 5.

Эффективная скорость откачки: 75 л/с

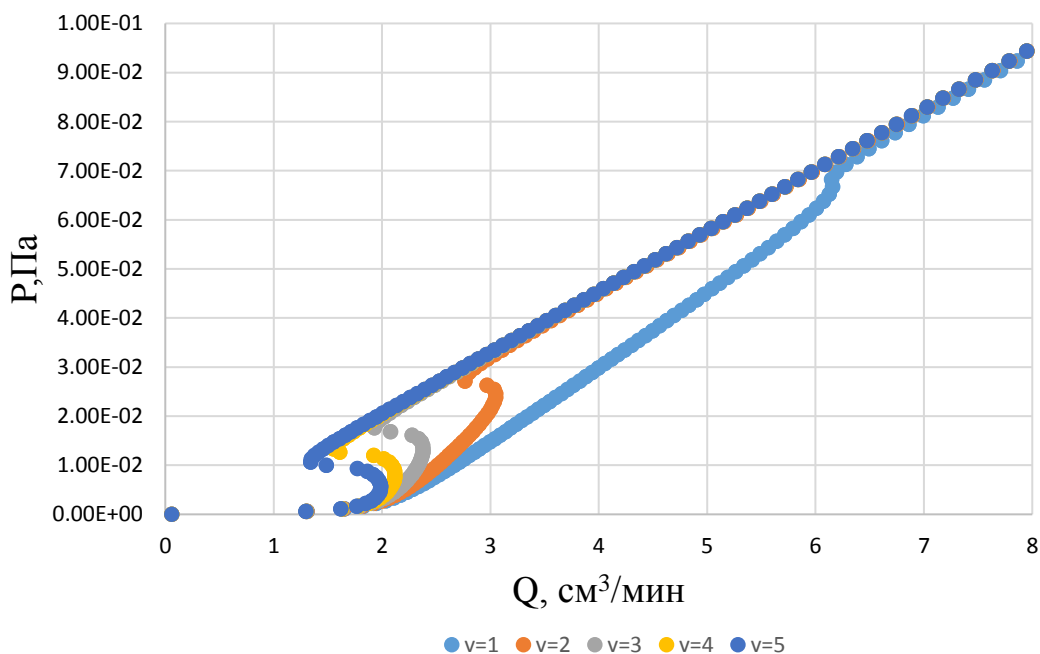


Рисунок 3.9 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях скорости химической реакции

При исследовании кривой гистерезиса от скорости химической реакции, у нитрида титана при увеличении скорости, область гистерезиса уменьшается и уходит более высокие значения расхода.

Таблица 3.6 – Область гистерезиса при разных значениях скорости химической реакции

Скорость реакции, $10^{-23}$ см <sup>3</sup> /с	химической	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
1		1.34-1.97
2		2.59-3.04
3		1.94-2.37
4		1.77-2.11
5		5.95-6.11

### 3.9 Исследование зависимости гистерезиса от коэффициента прилипания

Мощность, Вт: 500

Давление рабочего газа (Ar), Па: 0,1

Давление реактивного газа (O<sub>2</sub>), Па: 0 – 0,4

Коэффициент прилипания: 0.1;0.01;0.5;1.

Эффективная скорость откачки: 75л/с

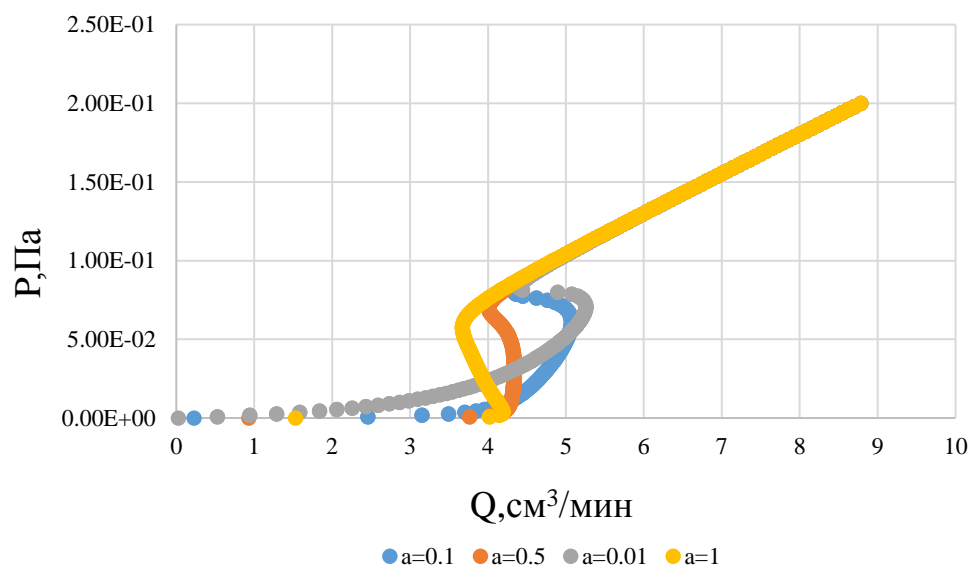


Рисунок 3.10 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при разных значениях коэффициента прилипания.

У нитрида титана при значительно больших значениях коэффициента прилипания как видим, область гистерезиса уменьшается.

### 3.10 Исследование зависимости доли $\theta_m$ , $\theta_c$ , $\theta_r$ поверхности подложки и мишени, покрытых металлом и соединением от расхода для оксида и нитрида титана

Напряжение: 320 В

Мощность: 1000Вт

Сила тока: 3.125

Скорость откачки: 150 л/с

Давление рабочего газа: для  $TiO_2$  =0.086 Па

для  $TiN$ =0.083 Па

Максимальное давление реактивного газа: 0.2 Па

Парциальный коэффициент распыления для оксида титана  $Y_{Ti}$  = 0.13

Полный коэффициент распыления оксида титана  $Y_{TiO_2}$ =0.042

Парциальный коэффициент распыления для нитрида титана  $Y_{Ti}$  = 0.2

Полный коэффициент распыления нитрида титана  $Y_{TiO_2}$ =0.032



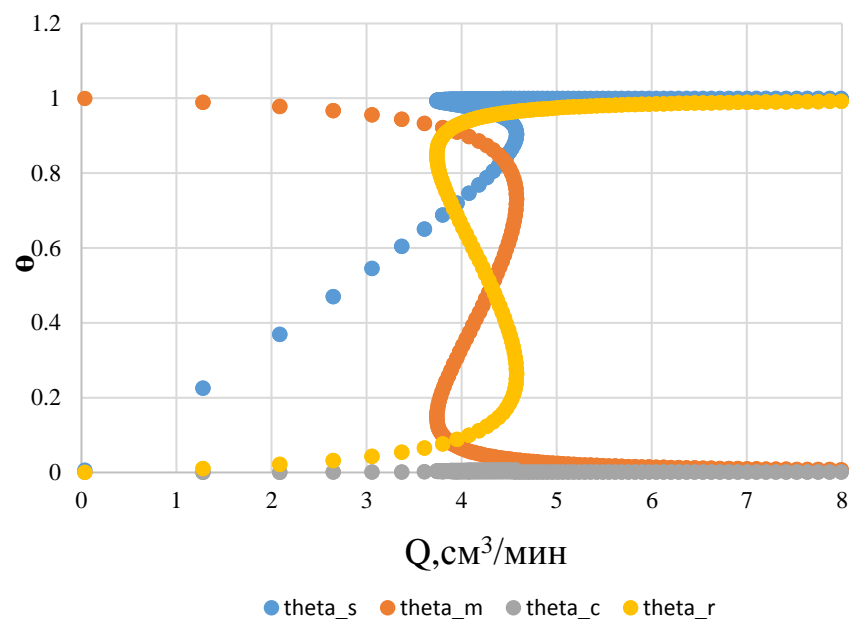


Рисунок 3.11 – Зависимости доли  $\theta_m$ ,  $\theta_c$ ,  $\theta_r$  поверхности подложки и мишени, покрытых металлом и соединением от расхода реактивного газа для оксида титана

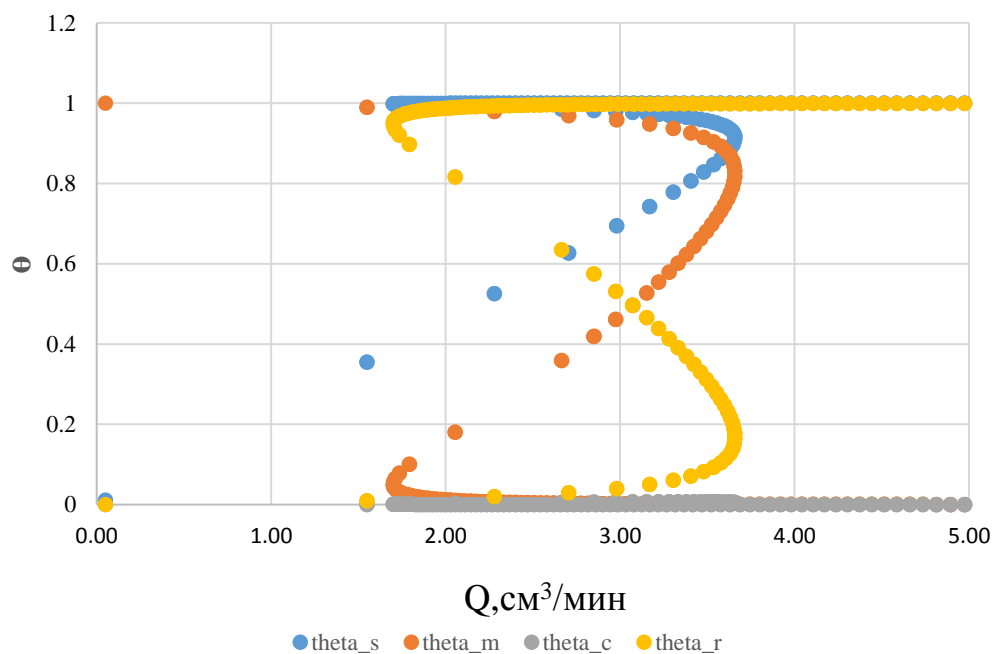


Рисунок 3.12 – Зависимости доли  $\theta_m$ ,  $\theta_c$ ,  $\theta_r$  поверхности подложки и мишени, покрытых металлом и соединением от расхода реактивного газа для нитрида титана

Из рисунков 3.11 и 3.12 можно сделать вывод, что при относительно низких значениях расхода реактивного газа имеет место металлическая мода процесса. Получаемая при таких условиях пленки оксида и нитрида титана имеют концентрацию реактивного газа в плёнке меньшую, чем требует стехиометрия химического соединения. При достижении потока реактивного газа некоторого критического значения, распылительный процесс переходит в реактивную моду. При этом на поверхности мишени образуется тонкий слой соединения. При этом резко снижается скорость нанесения, и падает расход реактивного газа.

### **3.11 Расчеты согласно нестационарной модели для установки среднечастотного магнетронного напыления**

В нестационарной модели программа моделирует процесс снятия кривой гистерезиса. Выставляется значение расхода, как это делается в эксперименте, в течении некоторого времени регистрируются значения расхода и давления. Этот процесс повторяют несколько раз, пока расход не дойдет до нужного максимального значения, затем аналогично производятся вычисления при снижении расхода от максимального до минимального. Для иллюстрации этого процесса приведены зависимости от времени для расхода и давления реактивного газа; долей поверхности мишени и подложки, покрытых металлом и соединением

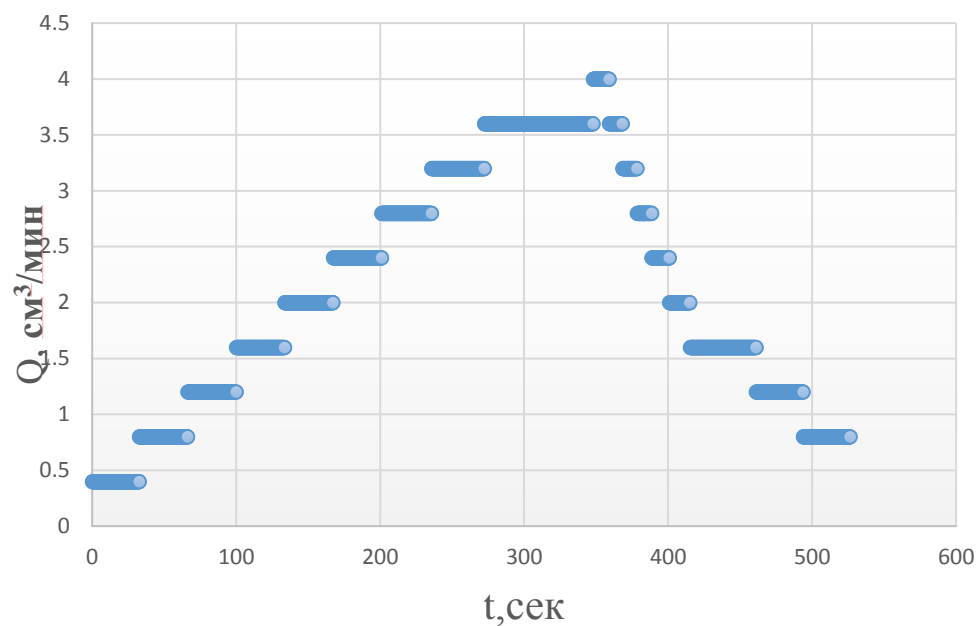


Рисунок 3.13 – Зависимость расхода реактивного газа от времени

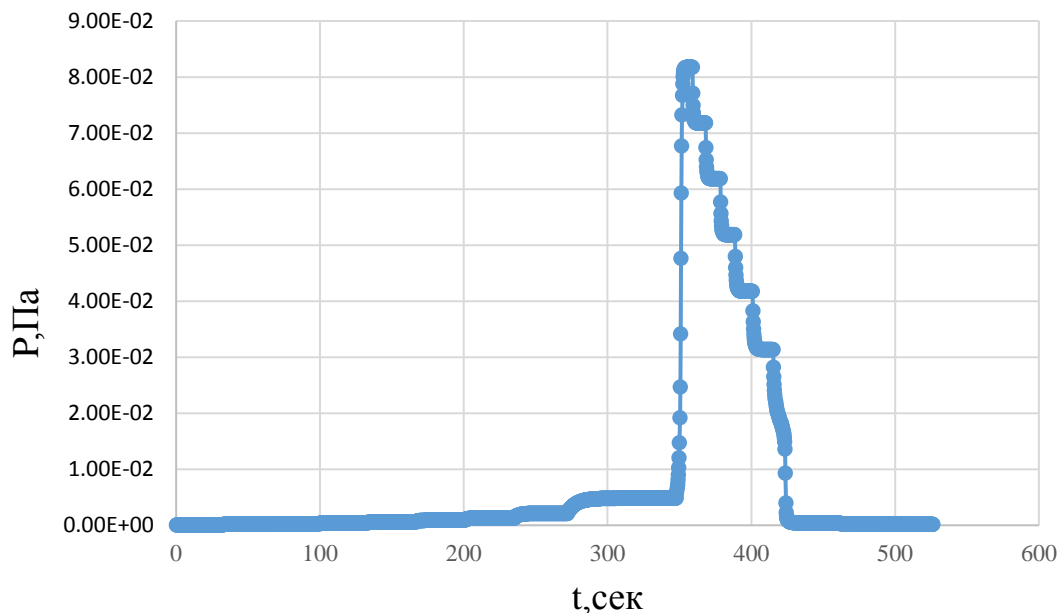


Рисунок 3.14 – Зависимость давления от времени

Из анализа зависимости давления от времени следует, что при скачкообразном изменении расхода давление начинает экспоненциально изменяться (увеличиваться при росте расхода и уменьшаться при падении) и через некоторое время стабилизируется до следующего изменения расхода. Время релаксации этого процесса – т.е. время за которое дополнительное давление изменяется в  $e$  раз – не является постоянным и изменяется от 2,5 с до 6,5 с при увеличении расхода и от 0,5 с до 2,5 с при уменьшении расхода.

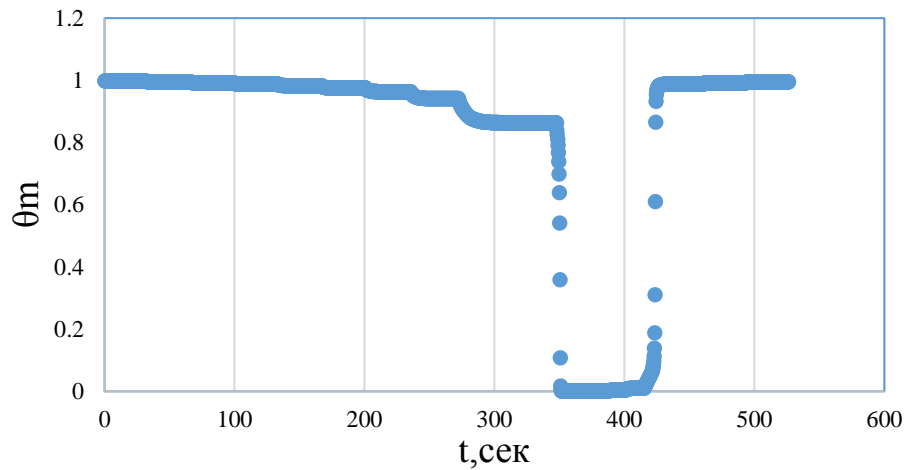


Рисунок 3.15 – Зависимость доли покрытой металлом на мишени от времени

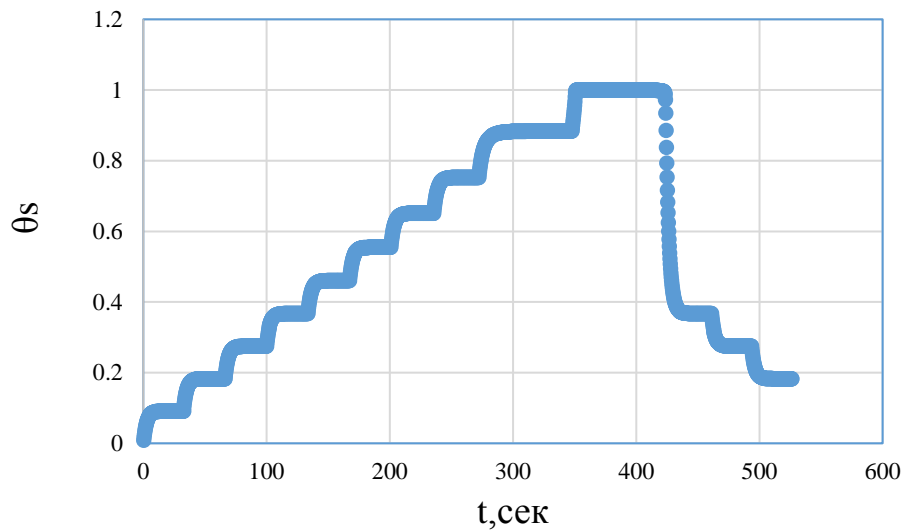


Рисунок 3.16 – Зависимость доли покрытой соединением на подложке от времени

Из рисунка 3.15 можно сделать вывод что, в начале времени мишень полностью покрывается долей металла и в определенный момент времени доля металла начинает снижаться.

На рисунке 3.16 доля, покрытая соединением по прошествии времени ступенчато, увеличивается и в определенный момент времени начинает снижаться также, как и расход.

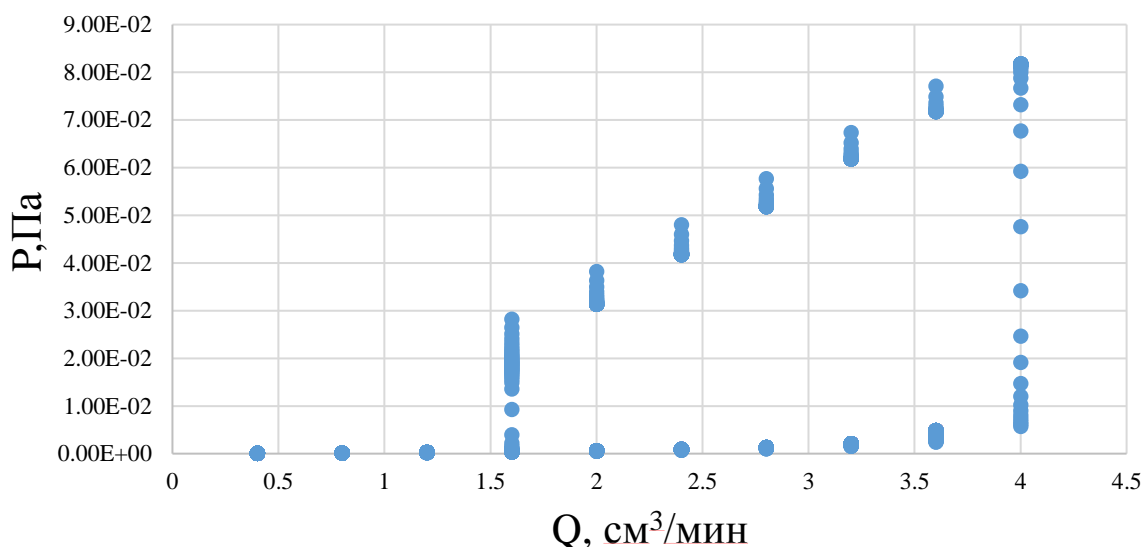


Рисунок 3.17 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления

Была построена кривая гистерезиса согласно нестационарной модели. Данный график иллюстрирует процесс снятия кривой в экспериментальных условиях

### 3.12 Анализ результатов расчета с экспериментальными данными и уточненными значениями параметров модели

В ходе исследования были подобраны значения параметров модели, так, чтобы теоретическая кривая проходила максимально близко к экспериментальной. Ниже в таблице 3.7 указаны уточненные значения параметров. На рисунке 3.18 приведены соответствующие теоретическая и экспериментальная зависимости давления реактивного газа от расхода.

Таблица 3.7 – Уточнённые значения параметров

$P_{ar}=0.086$ Па
$T=300$ К
$M_{O_2}=32$ г/моль

$I=3.125 \text{ A}$
$M_{Ti}=47.86 \text{ г/моль}$
$\rho=4.54 \text{ г/см}^3$
$Y_{Ti}=0.13$
$Y_{TiO_2}=0.042$
Среднее квадратичное отклонение 0.6
Кнопк-он коэффициент - 0.3
Скорость химической реакции – $10 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3/\text{с}$
Коэффициент прилипания – 0.1

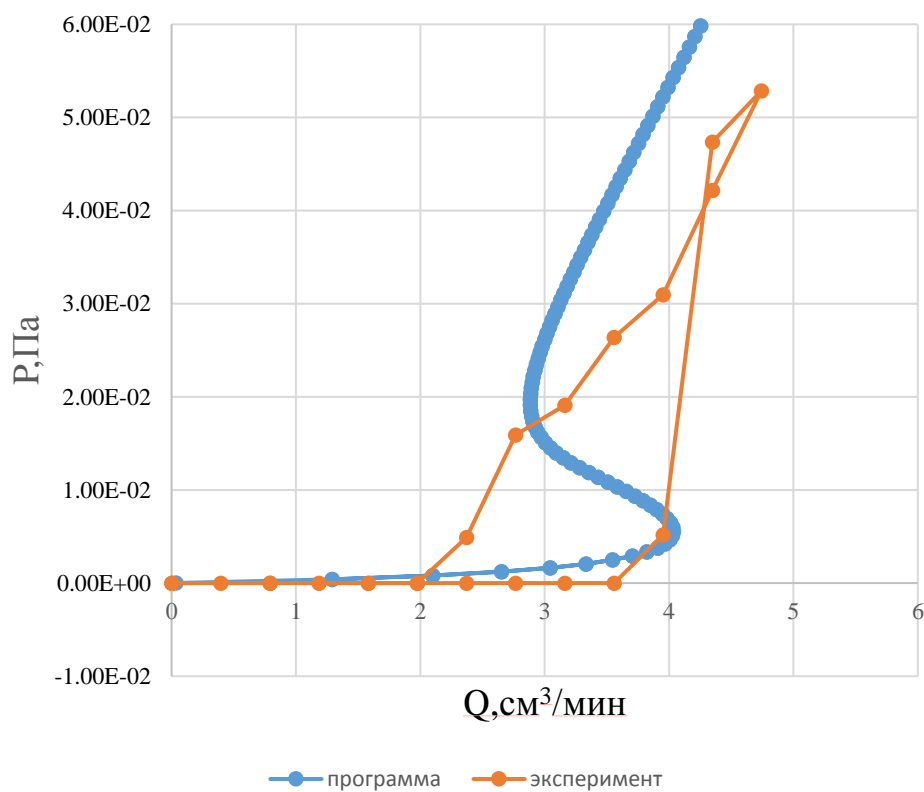


Рисунок 3.18 – Максимально близко подходящий к эксперименту результат моделирования кривой гистерезиса при 1000 Вт

С этими параметрами было проведено моделирование процесса реактивного напыления при разных значениях мощностей. Результаты приведены на рис.3.19-3.21.

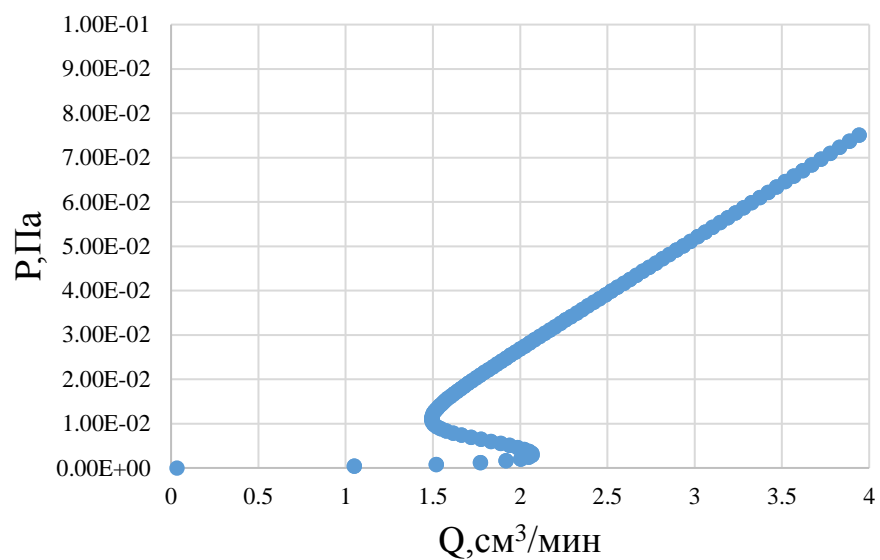


Рисунок 3.19 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления при 500 Вт

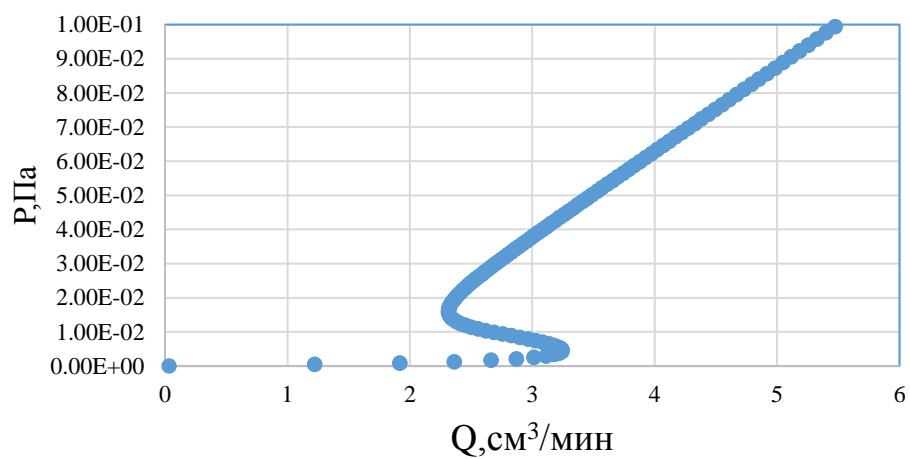


Рисунок 3.20 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления 800 Вт

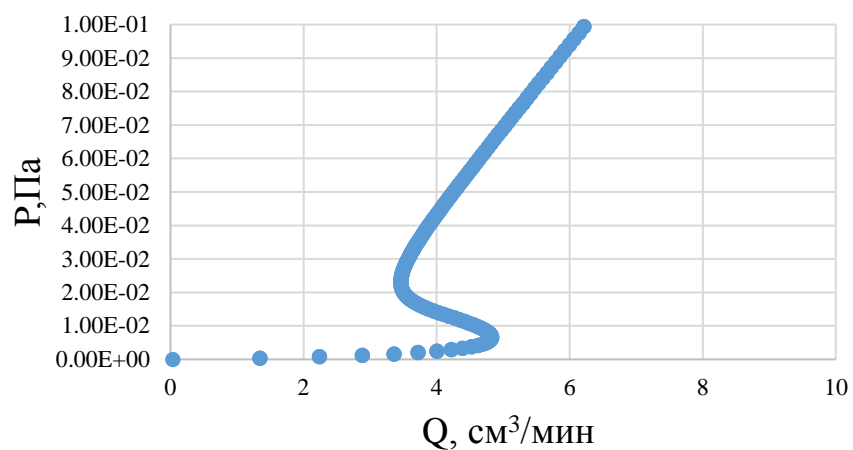


Рисунок 3.21 – Зависимость расхода реактивного газа от парциального давления 1200 Вт

В таблице 3.8 приведены границы областей гистерезиса для всех рассмотренных значений мощности разряда

Таблица 3.8 – Граница областей гистерезиса для всех рассмотренных значений мощности

Мощность, Вт	Область гистерезиса, см <sup>3</sup> /мин
500	1.5-2.06
800	2.3-3.2
1000	2.7-3.9
1200	3.6-4.8

Область гистерезиса соответствует переходному режиму реактивного напыления, при котором наблюдаются максимальные скорости роста покрытия.

Это можно проиллюстрировать диаграммой, приведенной на рисунке 3.22

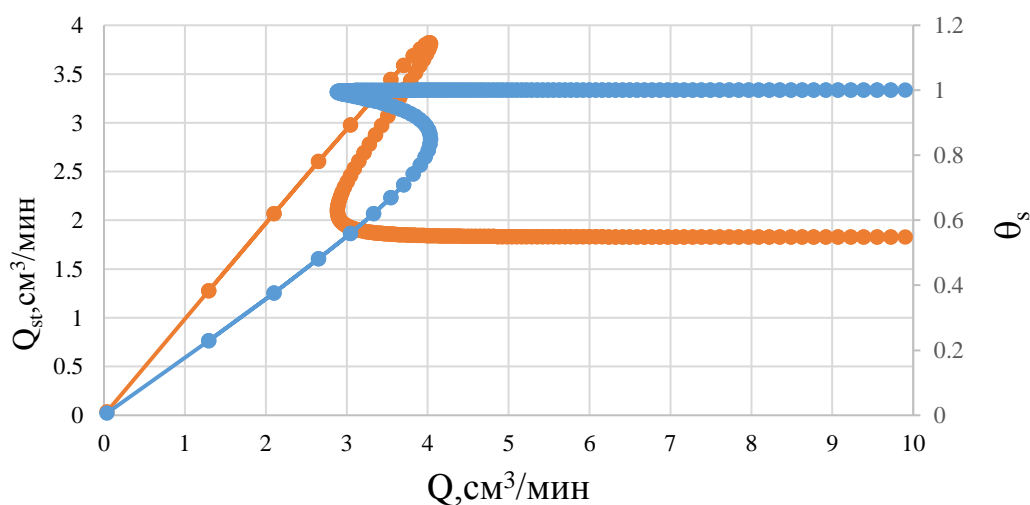




Рисунок 3.22 – Зависимости от расхода реактивного газа доля поверхности подложки  $s$ , покрытой соединением (по левой оси); и суммарного потребления реактивного газа  $Q_{st}$  на мишени и подложке (по правой оси).

Как можно увидеть из рисунка, максимальная скорость потребления реактивного газа, и, следовательно, и скорость роста покрытия, достигается при увеличении расхода до 4 мл/мин, что соответствует одной из границ области гистерезиса. Доля поверхности подложки, покрытая соединением при этом близка к 1. При дальнейшем увеличении расхода, скорость потребления газа резко падает, что соответствует переходу в реактивный режим. Следовательно, оптимальным режимом для обеспечения максимальной скорости напыления является режим с величиной расхода реактивного газа около правой границы области гистерезиса, достигаемый при увеличении давления. Отметим, что данное состояние не устойчиво и флуктуации потока газа, напряжения разряда и т.д. могут привести к смене режима на реактивный. При это необходимо выйти за пределы области гистерезиса, уменьшив расход, и затем возвратится в точку максимальной скорости увеличением расхода

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 4.1 Предпроектный анализ

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Главная задача составляет создание биосовместимых покрытий на основе оксидов и нитридов титана методом реактивного магнетронного напыления, при этом обработана измерение зондовых параметров. Данные были обработаны на программе Wolfram Mathematic. Результат исследования имеет хороший перспектив и потенциал.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность	
					$K_{k1}$	$K_{k2}$
1	2				7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>						
1. Повышение производительности труда пользователя	0,2				0,8	0,6
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,06			,3	,18	,18
3. Надежность	0,05			,25	,2	,15

4. Простота эксплуатации	0,07				,35	,21	0,21
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,09				,45	,27	0,27
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06				,3	,24	0,18
2. Уровень проникновения на рынок	0,07				,28	,35	0,35
3. Цена	0,09				,45	,36	0,36
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07				,35	,35	0,35
5. Послепродажное обслуживание	0,06				,3	,18	0,12
6. Финансирование научной разработки	0,05				,12	,15	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,05				,2	,16	0,16
8. Наличие сертификации разработки	0,08				,24	,3	0,24
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>,59</b>	<b>,75</b>	<b>0,3</b>

#### 4.1.3 SWOT-анализа

Для исследования коммерциализации проекта и для расчета бюджета необходимо провести SWOT-анализ.

Анализ проводится в несколько этапов.

Первый этап SWOT-анализа заключается в описании сильных (Strengths) и слабых (Weaknesses) сторон проекта, в раскрытии возможностей (Opportunities) и угроз (Threats) для реализации проекта, которые могут появиться в его внешней среде.

Результаты первого анализа представлены в таблице 4.3.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходят к реализации второго этапа.

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	С1. Заявленная экономичность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.	Сл1. Длительный период при некоторых видах исследований. Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения исследований Сл3. Недостаток финансовых средств Сл4. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ
<b>Возможности:</b>		

<p>В1. Интерес к подобным исследованиям со стороны иностранных партнеров</p> <p>В2. Использование научно-исследовательские достижения ТПУ</p> <p>В3. Ценовая стабильность на рынке товаров-конкурентов</p>		
<b>Угрозы:</b>		
<p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>		

После того как сформулированы четыре области SWOT переходят к реализации второго этапа.

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Использование интерактивной матрицы помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица работы

Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4

Возможности проекта	B1	+	+	+	0
	B2	+	+	+	-
	B3	-	-	-	0

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: B1C1C2C3; B2C1C2C3. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта. В таблице факторы помечаются: соответствие сильных сторон возможностям знаком плюс «+»; слабое соответствие знаком минус «-»; если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-» - знак «0» (таблица 4.3).

Третий этап включает в себя итоговую матрицу SWOT-анализа, которая приводится в магистерской диссертации (таблица 4.4).

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Таблица 4.4 – SWOT анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	С1. Заявленная экономичность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.	Сл1. Длительный период при некоторых видах исследований. Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения исследований Сл3. Недостаток финансовых средств Сл4. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ

<b>Возможности:</b>		
<p>В1. Интерес к подобным исследованиям со стороны иностранных партнеров</p> <p>В2. Использование научно-исследовательские достижения ТПУ</p> <p>В3. Ценовая стабильность на рынке товаров-конкурентов</p>	<p>При использовании научно-исследовательских достижений ТПУ можно повысить снизить стоимость производимой продукции и тем самым заявить об экономичности, экологичности технологии, а также повышении квалификации персонала.</p>	<p>Научно-исследовательские достижения ТПУ могут быть использованы при отсутствии необходимого оборудования и недостатке финансирования.</p>
<b>Угрозы:</b>		
<p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>	<p>Заявленная экономичность и энергоэффективность может быть не оправдана при отсутствие спроса на новые технологии, ограничении на экспорт и несвоевременном финансировании научного исследования.</p>	<p>Отсутствие необходимого оборудования и длительность периода исследований может привести к отсутствию спроса на новые технологии.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом, если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

#### **4.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

Ниже представлена таблица степени готовности к коммерциализации научной разработки, а также компетенция разработчика научного проекта. Оценка осуществляется по шкале от 1 до 5 приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	2
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	1
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2



13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	1	1
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	24	26

Перспективность проекта ниже среднего, следовательно, для реализации проекта необходимо привлечь специалистов в сфере маркетинга, продумать вопросы финансирования со стороны предприятий. Также необходимо привлечь/обучить специалистов, работающих в области радиационных технологий и обладающими навыками работы на вакуумных установках.

#### **4.3 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Задача данного раздела магистерской диссертации – это выбор метода коммерциализации объекта

исследования и обоснование его целесообразности. Для того чтобы это сделать необходимо ориентироваться в возможных вариантах.

Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок.

1. *Торговля патентными лицензиями*, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяющие виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, сублицензии, опционы.

2. *Передача ноу-хау*, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

3. *Инжиниринг* как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

4. *Франчайзинг*, т.е. передача или переуступка (на коммерческих условиях) разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

5. *Организация собственного предприятия*.

6. *Передача интеллектуальной собственности* в уставной капитал предприятия.

7. *Организация совместного предприятия*, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

8. *Организация совместных предприятий*, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого не достаточно (пункт 4 – 8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 - 3): Торговля патентной лицензией; передача ноу-хау и инжиниринг. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации пунктов, которые были выбраны.

#### 4.4 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в уставе проекта.

Ниже, в таблицах 5, 6, 7 представлены все необходимые данные, которые входят в устав проекта.

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
ТПУ, кафедра экспериментальной физики	Зондовые измерения параметров плазмы при осаждении тонких пленок оксидов и нитридов титана методом реактивного магнетронного напыления.

Таблица 4.7 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Исследовать методику обработки данных с зонда Ленгмюра и провести расчеты для установки магнетронного напыления оксинитридов титана в различных режимах.
----------------------	--

<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Получение различными методами вольт-амперную характеристики двойного зонда Ленгмюра при различных режимах.
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Законченная научно-исследовательская работа.
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Результат проекта должен иметь актуальное теоретическое и практическое значение
	Наглядные иллюстрации (графики и диаграммы)
	Выполнения проекта в срок

#### 4.4.1 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 7)

Таблица 4.8 – Рабочая группа проекта

п/п	№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1		Евдокимов Кирилл Евгеньевич кафедра ЭФ, доцент,	Руководитель	Координация деятельности проекта	440
2		Назарбекова Назерке Кайраткызы,	Исполнитель	Выполнение исследовательской работы	784

	НИ ТПУ, кафедра ЭФ, студентка			
ИТОГО:				1224

#### 4.4.2 Ограничения и допущения проекта.

Таблица 4.9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	220 507,06
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ кафедра ЭФ
3.2. Сроки проекта:	30.01.17-14.06.17
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	30.01.17
3.2.2. Дата завершения проекта	14.06.17

#### 4.5 Планирование управления научно-техническим проектом

##### 4.5.1 Иерархическая структура работ проекта

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рис. № 2 представлен шаблон иерархической структуры.



Рисунок 4.1 – Иерархическая структура по ВКР

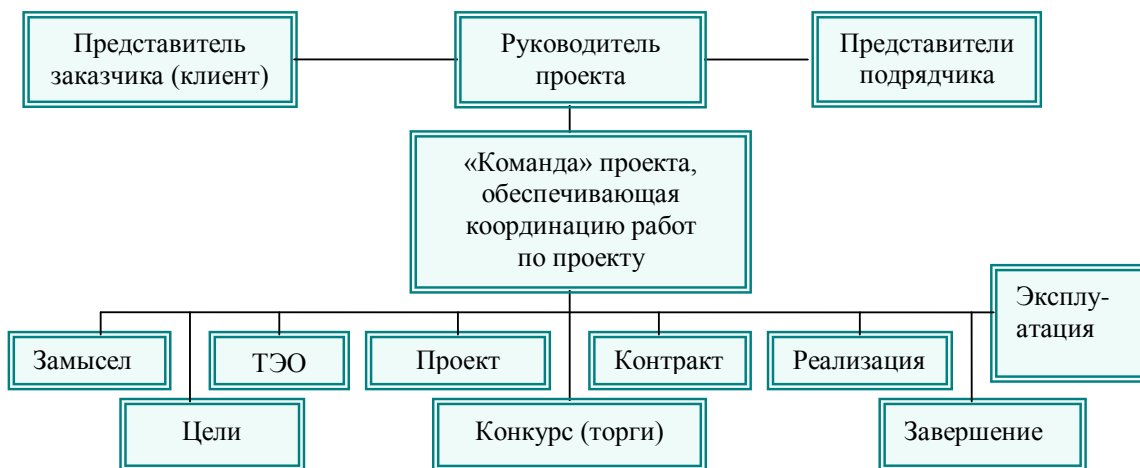


Рисунок. 4.2 – Проектной структуры проекта

Будем использовать проектную структуру проекта, так как она подходит больше, потому что технология является новая и не исследуемой ранее, сложность проекта высока.

## 4.5.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информацию необходимо свести в таблицу (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка ТЗ на ВКР	17.03.2017	Приказ о ВКР
1.1	Составление и утверждение технического задания	27.03.2017	Техническое задание
2	Выбор направления исследования и способов решения задач	31.03.2017- 03.04.2017	Методы решения задач
2.1	Сбор и изучение научно-технической литературы	04.04.2017- 21.04.2017	Список литературы
2.2	Моделирование технологического процесса на компьютере	24.04.2017- 8.05.2017	Графики
3	Разработка методики экспериментальных исследований	12.05.2017- 14.05.2017	Методика
3.1	Проведение экспериментальных Исследований	15.05.2017- 20.05.2017	Отчет
3.2	Анализ и обработка полученных результатов	21.05.2017- 23.05.2017	Графики
4	Обобщение и оценка результатов	24.05.2017	Расчеты и графики
4.2	Оформление пояснительной записки	25.05.2017- 02.06.2017	Пояснительная записка
4.3	Подготовка к защите ВКР	02.06.2017- 15.06.2017	Презентация



## 4.6 Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.6.1 План проекта

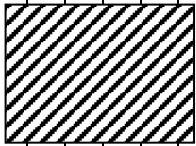
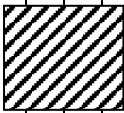



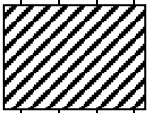

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Сроки проведения НИР представлены в таблицах 4.11 и 4.12

Таблица 4.11 – Календарный план проекта

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Определение темы исследовательской работы	5	01.02	05.02	руководитель, исполнитель, (магистрант)
2	Ознакомление с теоретическими данными	20	08.02	04.03	исполнитель, руководитель
3	Расчет на математической модели	4	07.03	12.03	исполнитель (магистрант)
4	Обсуждение полученных результатов	30	14.03	22.04	исполнитель
5	Оформление выводов	11	25.04	11.05	Руководитель, Исполнитель.
6	Оформление пояснительной записки	20	12.05	01.06	исполнитель
7	Подготовка к защите	12	02.06	14.06	исполнитель
Итого:		102	01.02	14.06	

Таблица 4.12 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Вид работ	Исполнители	к, ал, д н.	Продолжительность выполнения работ																
			нв	евр	арт	прел ь	ай	июнь											

Изучение литературы, составление литературного обзора	Магистрант	6																		
Расчет на математической модели	Магистрант	0																		
Обсуждение полученных результатов	Магистрант, руководитель	0																		
Оформление выводов	Магистрант	3																		
Оформление пояснительной записки	Магистрант	9																		



- Руководитель



-Дипломник.

#### 4.7 Бюджет научного исследования

Для коммерциализации разрабатываемой технологии необходимо рассчитать бюджет научного исследования (проекта). В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группировались по статьям, все данные представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Группировка затрат по статьям

Затраты по статьям
--------------------

Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрика ты	Специаль ное оборудование для научных (экспериментал ьных) работ	Осно вная заработная плата	Дополн ительная заработная плата	От числения на социальн ые нужды	Итого плановая себестоимос ть
291	25 000	139 440,06	13 944	41 832	220 507,06
600	32 000	140 000	14 000	40 000	226 600

В результате было получено, что бюджет затрат НИИ составит 220 507,06 руб. При этом затраты у конкурентов составляют 226 600 рублей, из чего можно сделать вывод что полученный продукт будет экономичней, чем у конкурентов.

#### 4.7.1 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме (таблица 4.14).

Таблица 4.14 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол- во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Тетрадь	48 листов	2	60	120
Ручка		4	20	80
Карандаш		2	12	24
Всего за материалы				224
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				67
Итого по статье $C_M$				291

Таблица 4.15 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Компьютер	1	25	25

#### 4.7.2 Основная заработная плата

Таблица 4.16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	151	151
Количество нерабочих дней	43	43
- выходные дни	11	11
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	24	-
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	73	97

Таблица 4.17 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</sub> , руб.	к <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель	3000,00	1,3	39000	177,73	73	12940,29
Магистрант	2750	1,3	2275	103,41	97	10030,77

#### 4.7.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Таблица 4.18 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант

Основная зарплата	129409,29	10030,77
Дополнительная зарплата	12940,929	-
Итого по статье $C_{зп}$	128611,31	10030,77

#### 4.7.4 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (4.1)$$

где  $k_{внеб} = 30\%$  коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 4.19 – Отчисления на социальные нужды

	<b>Руководите ль</b>	<b>Магистра нт</b>
Зарплата	129409,29	10030,77
Отчисления на социальные нужды	44646,204	3009,2

#### 4.7.5 Организационная структура проекта

Таблица 4.20 – Выбор организационной структуры научного проекта

<b>Критерии выбора</b>	<b>Функционал ьная</b>	<b>Матрич ная</b>	<b>Проект ная</b>
<b>Степень неопределенности условий реализации проекта</b>	Низкая	Высокая	Высокая
<b>Технология проекта</b>	Стандартная	Сложная	Новая
<b>Сложность проекта</b>	Низкая	Средняя	Высокая
<b>Взаимозависим ость между</b>	Низкая	Средняя	Высокая

<b>отдельными частями проекта</b>			
<b>Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)</b>	Низкая	Средняя	Высокая
<b>Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня</b>	Высокая	Средняя	Низкая

Вывод: на основе проведенного анализа выбора организационной структуры научного проекта, было выявлено, что наиболее выгодной является проектная структура.

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

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

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

#### 4.8.1 Динамические методы экономической оценки инвестиций

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**DPP**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

#### 4.8.2 Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0 \quad (4.2)$$

где  $ЧДП_{опt}$  – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

$I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

$t$  – номер шага расчета ( $t=0, 1, 2 \dots n$ );

$n$  – горизонт расчета;

$i$  – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Таблица 4.21 - Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
.	Выручка от реализации, тыс.руб	0	64,6	64,6	64,6	64,6
.	Итого приток	0	64,6	64,6	64,6	64,6
.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	220,5	0	0	0	0
.	Операционные затраты, тыс. руб С+Ам+ФОТ	0	5,5	5,5	5,5	5,5
.	Налогооб прибыль=1-4		29,1	29,1	29,1	29,1
.	Налоги Выр-опер=донал.приб*20%	0	5,8	5,8	5,8	5,8
.	Итого отток Опер.затр+налоги	220,5	1,3	1,3	1,3	1,3
.	Чистый денежный поток ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	220,5	39,2	39,2	39,2	39,2
.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i=0,20$ )	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
.	Дисконтированный чистый денежный поток ( $c7*c8$ )	220,5	15,9	6,6	0,45	7,09
0.	То же нарастающим итогом ( $NPV = 139,5$ )	220,5	104,6	8	2,45	39,5

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства:  $NPV > 0$ .

Чем больше  $NPV$ , тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.



Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 139.5 тыс. руб что позволяет судить о его эффективности.

### 4.8.3 Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 4.22).

Таблица 4.22 – Дисконтированный срок окупаемости

	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
.	Дисконтированный чистый денежный поток ( $i=0,20$ )	- 220,5	1 15,9	9 6,6	8 0,45	6 7,09
.	То же нарастающим итогом	- 220,5	- 104,6	- 8	7 2,45	1 39,5
.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{дск} = 2 + 8/80,45 = 2,1$ года				

### 4.8.4 Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому,

чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 20 и графика, представленного на рисунке 2.

Таблица 4.23 - Зависимость NPV от ставки дисконтирования

п/п	Наименование показателя	0	1	2	3	4	$PV^N$
	Чистые денежные потоки	- 220.5	115.9	9 6.6	80. 45	6 7.09	
	коэффициент дисконтирования						
	i=0,1	1	0,909	0 ,826	0,7 51	0 ,683	
	i=0,2	1	0,833	0 ,694	0,5 78	0 ,482	
	i=0,4	1	0,714	0 ,51	0,3 64	0 ,26	
	i=0,5	1	0,667	0 ,444	0,2 95	0 ,198	
	Дисконтированный денежный поток						
	i=0,1	- 220.5	105.3 5	7 9.79	60. 41	4 5.82	7 0.87
	i=0,2	- 220.5	96.5	6 7.04	46. 50	3 2.33	2 1.87
	i=0,4	- 220.5	82.75	4 9.26	29. 28	1 7.44	- 41.77
	i=0,5	- 220.5	77.30	4 2.89	23. 73	1 3.28	- 63.3

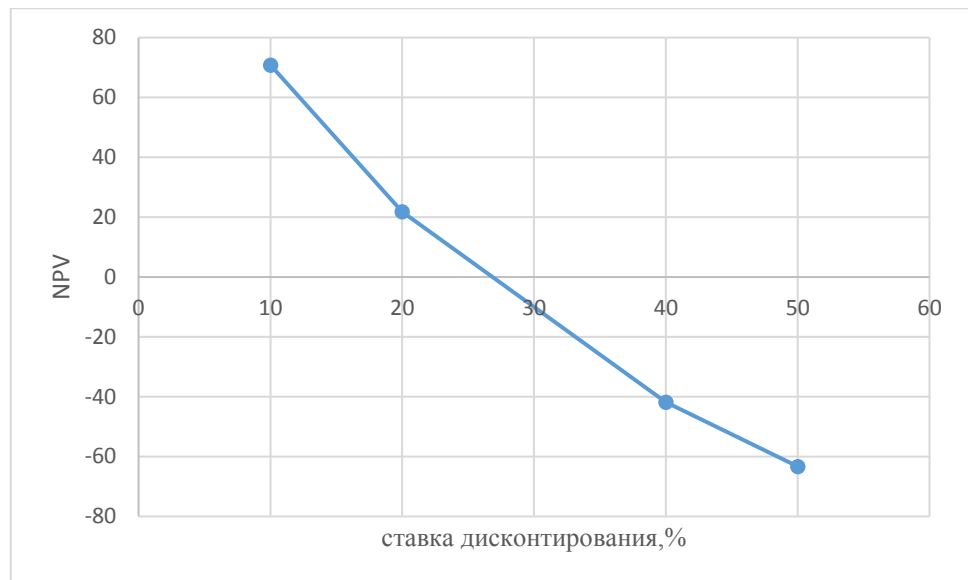


Рисунок 4.3 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,28.

#### 4.9 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0, \quad (4.3)$$

где  $I_0$  – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{115,9 + 96,6 + 80,45 + 67,09}{220,5} = 1,63$$

$PI=1,63 > 1$ , следовательно, проект эффективен при  $i=0,2$ ;

#### 4.9.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Таблица 4.24 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения а налога №	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	500	100000	144 674	434 02,2	288 576,2
2	1000	150000	160 845	482 53,5	360 098,5

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{276150}{360098,5} = 0,76$$

$$I_{\phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{288576,2}{360098,5} = 0,80$$

$$I_{\phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{360098,5}{360098,5} = 1$$

где  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (4.4)$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 4.25 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	3	4
3. Помехоустойчивость	0,1	5	4	3
4. Энергосбережение	0,2	5	4	2
5. Надежность	0,30	5	5	5
6. Материалоемкость	0,1	1	2	3
ИТОГО	1	25	22	20

$$I_m^p = 5 * 0.15 + 4 * 0.15 + 5 * 0.1 + 5 * 0.2 + 5 * 0.30 + 1 * 0.1 = 4.45$$

$$I_1^A = 4 * 0.15 + 3 * 0.15 + 4 * 0.1 + 4 * 0.2 + 5 * 0.30 + 2 * 0.1 = 3.95$$

$$I_2^A = 3 * 0.15 + 4 * 0.15 + 3 * 0.1 + 2 * 0.2 + 5 * 0.30 + 3 * 0.1 = 3.55$$

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

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,45}{0,76} = 5,85$$

$$I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_\phi^{a1}} = \frac{3,95}{0,80} = 4,93$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^{a2}}{I_\phi^{a2}} = \frac{3,55}{1} = 3,55$$

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

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{5,85}{4,93} = 1,18$$

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a2}} = \frac{5,85}{3,55} = 1,64$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_m^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_m^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 4.26 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,80	1	0,76
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,95	3,55	4,45
3	Интегральный показатель эффективности	5,85	4,93	3,55
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,18		1,64

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в

магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе проведения анализа показателей, была получена чистая текущая стоимость (NPV) –220,5 тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта ( $PP_{\text{дск}}$ ) составляет 2,1 года. Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,28, что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как выполняется условие неравенства  $IRR > i$ , индекс доходности (PI) – 1,63, и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения нормативных условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от опасных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами.

В современных условиях развития общества решение проблем, связанных с обеспечением безопасной жизнедеятельности человека во всех сферах его деятельности от опасных и вредных факторов, является актуальным. Опасным фактором является фактор процесса, воздействие которого на работающего приводит к травме или резкому ухудшению здоровья. Вредные факторы - это неблагоприятные факторы трудового процесса или условий окружающей среды, которые могут оказать вредное воздействие на здоровье и работоспособность человека. Длительное воздействие на человека вредного производственного фактора приводит к заболеванию. Вредный производственный фактор может стать опасным в зависимости от уровня и продолжительности воздействия на человека.

В настоящей выпускной работе ведется исследование биосовместимых покрытий на основе оксидов и нитридов титана моделирование гистерезиса методом реактивного магнетронного напыления, гистерезиса . Данные были обработаны на программе RSD2013.

### **5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

При работе на ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

- физические:
  - температура и влажность воздуха;
  - шум;



- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой чистоты;
- освещённость;
- наличие излучения;
- психофизиологические.

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

## **5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.**

### **5.2.1 Требования к ПЭВМ и организация работы организационные мероприятия.**

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

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

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

### **5.3 Технические мероприятия**

Технические мероприятия Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств

труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показана на рисунке 5.1.

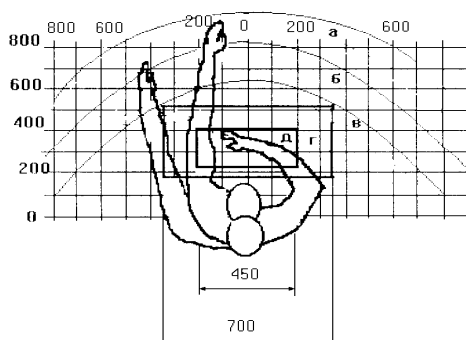


Рисунок 5.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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

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

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 - 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.

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

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более  $45^{\circ}$  к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять  $30^{\circ}$ . Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### **5.4 Условия безопасной работы**

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат - комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека. К микроклиматическим показателям относятся температура, влажность и скорость движения воздуха, температура поверхностей ограждающих конструкций, предметов, оборудования, а также некоторые их производные.

Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма. Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата.(табл.5.1) В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения [28].

Таблица 5.1 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-23°С 40-60% до 0,1м/с
Теплый	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	22-24°С 40-60% 0,1-0,2м/с

Научно-исследовательская работа выполнялась с помощью персональных компьютеров. При этом основным вредным фактором для инженера-исследователя является электромагнитное излучение, которое влияет на костные ткани, ухудшает зрение, повышает утомляемость, а также может вызвать ослабление памяти и возникновение онкологических заболеваний.

Таблица 5.2 – Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 и представлены в таблице 2. Для того, чтобы снизить вредное

влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1. Продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч, ребенка – 10 - 20 мин, в зависимости от возраста. В процессе работы желательно менять тип и содержание деятельности, например, чередовать редактирование и ввод данных и их считывание. Санитарными нормами предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата.

2. Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см.

3. Для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения (предельно допустимая доза облучения 0,5-0,7 мбэр) от монитора ПК рекомендуется использовать защитные экраны из металлической сетки и металлических прутков в виде навесов, козырьков, и допустимая величина защитного сопротивления заземления экранирующих устройств не должна быть более 4 Ом.

Шум – совокупность аperiodических звуков различной интенсивности и частоты. С физиологической точки зрения шум – это всякий неблагоприятный воспринимаемый звук [26].

Шум ухудшает условия труда оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до

стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация.

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, компьютер, вентиляторы системы охлаждения.

Уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров (ВЦ) может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы [27].

Важное место в комплексе мероприятий по созданию условий труда, работающих с ПЭВМ, занимает создание оптимальной световой среды, т.е. рациональная организация естественного и искусственного освещения помещения и рабочих мест.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры:

- при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная 750лк; аналогичные;

- при выполнении работ средней точности 200 и 300лк соответственно.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

## **5.5 Электробезопасность**

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

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;



-при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Поражение электрическим током происходит, когда человеческий организм вступает в контакт с источником напряжения. Коснувшись проводника, который находится под напряжением, человек становится частью электросети, по которой начинает протекать электрический ток. Как известно, организм человека состоит из большого количества солей и жидкости, что является хорошим проводником электричества, поэтому действие электрического тока на организм человека может быть летальным.

Последствия, которые возникнут в результате **действия электрического тока на человека** зависят от многих факторов, а именно:

- от величины и рода протекающего тока, переменный ток является более опасным, чем постоянный;

- продолжительности его воздействия, чем больше время **действия тока на человека**, тем тяжелее последствия;

- пути протекания, самую большую опасность представляет ток, протекающий через головной и спинной мозг, область сердца и органов дыхания(легкие);

- от физического и психологического состояния человека. Организм человека обладает неким сопротивлением, это сопротивление варьируется в зависимости от состояния человека.

Минимальная величина тока, которую способен почувствовать человеческий организм составляет 1 мА.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок: - отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

## **5.6 Пожарная и взрывная безопасность**

Согласно, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий [30].

Возможные причины загорания:

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

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

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации. (рис.5.2)

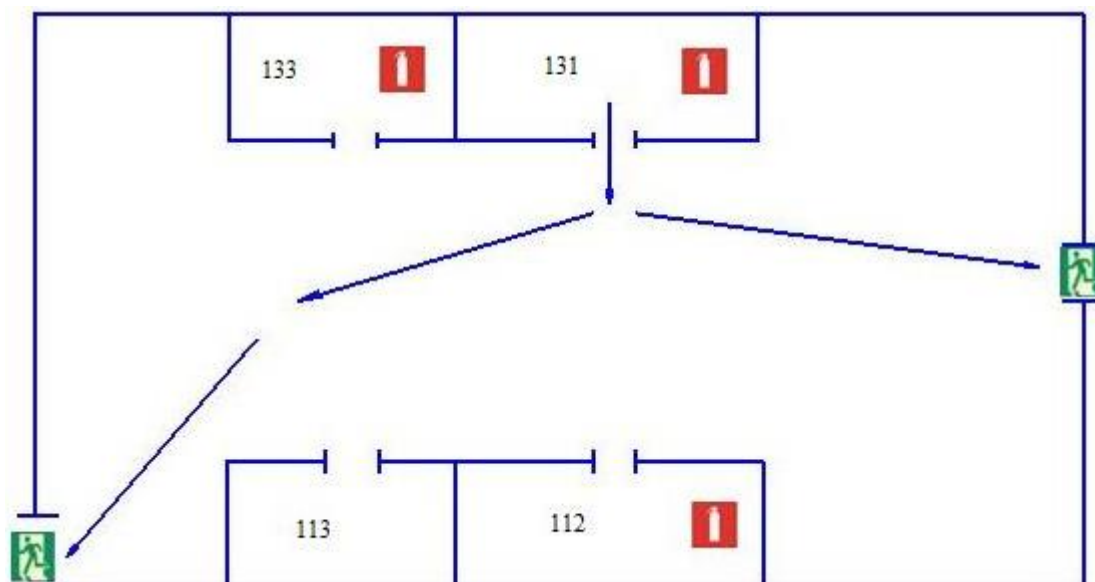


Рисунок 5.2 – План эвакуации из рабочего помещения

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному).
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС–тел. 112.
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## Заключение

1. Исследованы зависимости параметров процесса при реактивном магнетронном напылении оксида титана в различных режимах с помощью компьютерной программы RSD2013 для стационарной модели.

2. Определено, что для оксида и нитрида титана при увеличении тока, мощности, давления рабочего газа область гистерезиса увеличивается и уходит в область более высоких значений расхода

3. При исследовании гистерезиса от скорости химической реакции для оксида и нитрида титана, определено, что при увеличении скорости область гистерезиса уменьшается и уходит в область меньших значений расхода.

4. При исследовании зависимости от коэффициента прилипания, выявлено значительное влияние на гистерезис. В случае оксида титана, при увеличении коэффициента прилипания область гистерезиса увеличивается, при малых значениях коэффициента петля гистерезиса уменьшается. В случае нитрида титана при увеличении коэффициента прилипания область гистерезиса уходит более маленьких значений расхода.

5. Подобраны значения параметров модели реактивного магнетронного напыления, так, чтобы теоретическая кривая проходила максимально близко к экспериментальной установки УВН-200МИ. С данными параметрами проведены вычисления для основных режимов работы установки и определены границы областей гистерезиса. Показано, что правая граница области гистерезиса, достигаемая при увеличении расхода реактивного газа соответствует максимальной скорости образования соединения и, соответственно, роста покрытия.

6. Проведены расчеты согласно нестационарной модели получены зависимости от времени для расхода и давления реактивного газа. Из анализа зависимости давления от времени следует, что время релаксации системы после изменения расхода, не является постоянным и изменяется от 2,5 с до 6,5 с при увеличении расхода и от 0,5 с до 2,5 с при уменьшении расхода.

## Список литературных источников

1. Барыбина А.А., Шаповалов В.И. Пленки оксидов переходных металлов: физика и технология реактивного распыления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ"ЛЭТИ", 2009. 176 с
2. E. Kusano, D. M. Goulart / Time-dependent simulation modelling of reactive sputtering // *Thin Solid Films*. 1990, V. 193–194. P. 84–91.
3. S. Zhu, F. Wang, W. Wu / Simulations of reactive sputtering with constant voltage power supply // *J. Appl. Phys.* 1998, V. 84. P. 6399–6408.
4. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. — Киев: «Аверс», 2008. 102с.
5. Блонский И.В., Гончаров А.А., Демчишин А.В. и др. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. Вып. 7. С. 127–132
6. E. Kusano, A. Kinbara / Investigation of the effect of pumping speed and Ar/O<sub>2</sub> ratio on the transient time mode transition in Ti–O<sub>2</sub> reactive sputtering // *Thin Solid Films*. 1996, V. 281–282. P. 423–426.
7. A. Belkin, A. Freilich, J. Lopez et.al. / Characterization of pulsed dc magnetron sputtering plasmas // *New J. Phys.* 2005, V. 7. P. 90–106.
8. H. Barankova, S. Berg, C. Nender et.al. / Hysteresis effects in the sputtering process using two reactive gases // *Thin Solid Films*. 1995, V. 260. P. 181–186.
9. E. Kusano / An investigation of hysteresis effects as a function of pumping speed, sputtering current, and O<sub>2</sub>/Ar ratio, in Ti–O<sub>2</sub> reactive sputtering processes // *J. Appl. Phys.* 1991, V. 70. P. 7089–7096.
10. E. Särhammar, K. Strijckmans, T. Nyberg et.al. / A study of the process pressure influence in reactive sputtering aiming at hysteresis elimination // *Sur. Coat. Technol.* 2013, V. 232. P. 356–361.
11. S. Schiller, G. Beister, W. Seiber / Reactive high rate d. c. sputtering: deposition rate, stoichiometry and features of TiO<sub>x</sub> and TiN<sub>x</sub> films with respect to the target mode // *Thin Solid Films*. 1984, V. 111. P. 259–268.

12. S. Berg, H. O. Blom, M. Moradi et.al. / Process modeling of reactive sputtering // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989, V. 7. P. 1225–1229
13. S. Berg, H. O. Blom, T. Larsson et.al. / Modeling of reactive sputtering of compound materials // J. Vac. Sci. Technol. 1987, V. 5. P. 202–207.
14. S. Berg, T. Larsson, C. Nender et.al. / Predicting thin film stoichiometry in reactive sputtering // J. Appl. Phys. 1988, V. 63. P. 887–891.
15. S. Berg, E. Särhammar, T. Nyberg / Upgrading the “Berg-model” for reactive sputtering processes // Thin Solid Films. 2014, V. 565. P. 186–192.
16. С. Дэшман. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. 716 с.
17. D. Depla, S. Mahieu, R. De Gryse / Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties // Thin Solid Films. 2009, V. 517, P. 2825–2839
18. D. Depla, S. Heirwegh, S. Mahieu et.al. / Towards a more complete model for reactive magnetron sputtering // J. Phys. D. Appl. Phys. 2007. V. 40, P. 1957–1965.
19. K. Strijckmans, W.P. Leroy, R. De Gryse et.al. / Corrigendum to Modeling reactive magnetron sputtering: Fixing the parameter set // Surf. Coat.technol. 2012, V. 206. P. 3666–3675.
20. Strijckmans K 2013 RSD2013 v1.0 from [www.draft.ugent.be](http://www.draft.ugent.be)
21. Depla, D., Mahieu, S., and De Gryse, R. Reactive Sputter Deposition, chapter 5, Springer Berlin Heidelberg. 2008. P.153–197
22. Abe T and Yamashina T. // Thin Solid Films.1975, V.30. P.19
23. Heller J.//Thin Solid Films, 1973, V.71. P.63
24. Depla D and De Gryse R//Plasma Sources Sci. Technol.2001,V.105. P.47
25. Li C, Hsieh J H and Huang W M//Surf. Coat. Technol.2005, V.198. P.372



26. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности апапап
27. ГОСТ 12.3.002-75. Процессы производственные. Общие требования безопасности
28. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
29. Безопасность жизнедеятельности: Учебник/Под ред. проф. Э.А. Арустамова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2006.
30. Безопасность жизнедеятельности. /Под ред. Н.А. Белова - М.: Знание, 2000 - 364с
31. СНиП 23 – 05 –95. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. М.: Минстрой России, 1995
32. Справочная книга для проектирования электрического освещения. / Под ред. Г.Б. Кнорринга. – Л.: Энергия, 1976
33. ГОСТ 12.3.002-75. Процессы производственные. Общие требования безопасности
34. Федеральный Закон №214-ФЗ от 24.07.2007: «О драгоценных металлах и драгоценных камнях» (п. 2, ст. 20)
35. СанПиН: 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным вычислительным машинам и организации работы"

## Приложение А

### Раздел 1

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ОКСИДОВ И НИТРИДОВ ТИТАНА

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ51	Медетхан А.Е.		

Консультант кафедры ЭФ:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
профессор	Блейхер Г.А.	д.ф. – м.н.		

Консультант-лингвист кафедры ИЯФТ:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ст.преподаватель каф. ИЯФТ	Зяблова Н.Н.	канд.филол.наук.		

## 2. Materials and methods

### 2.1 Description of installation UVN-200MI

For the production of TiO<sub>2</sub> and TiN films, , the pulsed DC magnetron deposition system UVN-200MI was used -UVN-200MI. The photograph of this installation is shown in Figure 2.1.

Parameters of the installation of mid-frequency magnetron sputtering UVN-200MI:

Vacuum chamber: diameter - 380 mm, length - 450 mm

Voltage at the cathode: 320 V

Effective pumping speed: 75 l / s

Target: material – Ti

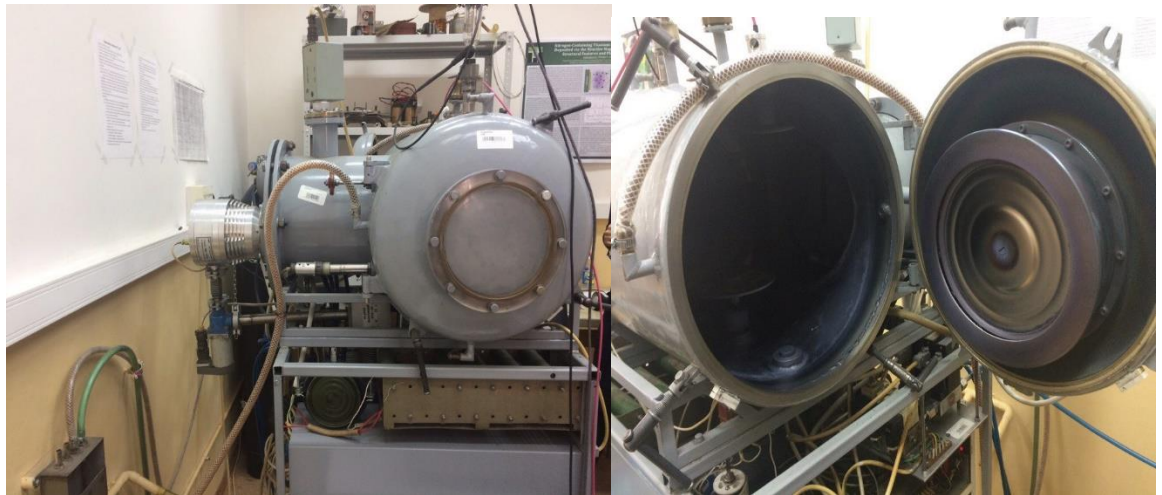


Figure 2.1 Installation UVN-200MI

The main objective of the installation is to deposit a complex oxide (TiO<sub>2</sub>) and oxynitride (Ti -O-N) coatings on various materials such as medical products, in particular intravascular stents. The block diagram of the installation of pulsed magnetron sputtering is shown in the figure. The installation consists of the following main parts: a cylindrical vacuum chamber with a magnetron located in it, a high vacuum evacuation system, a magnetron power source, a three-channel gas supply system, an automated control system for the installation including a peripheral controller unit, a control controller and a personal computer.

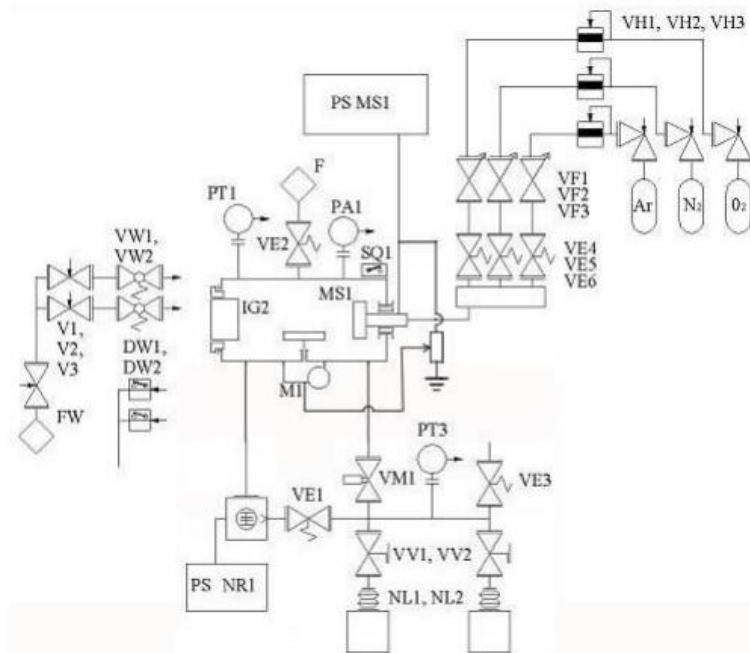


Figure 2.2 Block diagram of the installation UVN-200MI

The vacuum chamber is located horizontally, the chamber dimensions are: diameter - 300 mm, length - 600 mm, chamber volume is 0.42 m<sup>3</sup>. The chamber has doors on the end surfaces of the cylinder and a side outlet with a flange on which a turbomolecular pump is mounted. On the side cover of the chamber there is mounted a high vacuum sensor.. Inside the chamber there is a magnetron and a sample table with a rotation drive and a negative electric displacement system on the table.

The vacuum system includes low-vacuum and high-vacuum pumping. A high vacuum is created in two stages: first with two fore-vacuum pumps 2NVR-5DM (NL1 and NL2) to a pressure of 10Pa, then with a turbomolecular pump TMN-150 (NR1) up to 10<sup>-2</sup>Pa.

### 2.3 Algorithm for working with the program RSD

The RSD2013 software is compiled to run on a Windows platform. It mainly consist out of two executables: RSD2013\_GUI.exe and RSD2013.exe. The first executable is the graphical user interface (GUI)which creates the input files and can start up the RSD2013 simulations. The second executable is the effective simulation program. After generating an input with the GUI or manually, you can run RSD2013\_GUI.exeon the command line to perform the simulation.

Installation of the RSD2013 software is easy. Simply unpack the compressed zip file to a location of your choice and you are ready to use the software. The directories icons and templates should be left intact. Renaming the RSD2013.exeexecutable will make running simulations through the GUI impossible.

The RSD2013 software is developed to simulate the reactive sputter process of a DC magnetron. It's focus is on the possible hysteresis curve of this process. To this end, it solves the equations of the RSD2013 model.

The RSD model calculates following variables:

- the pressure  $P_r$  of the reactive gas in the system
- the compound  $\theta_r$ , chemisorbed  $\theta_c$  and metal  $\theta_m$  fractions on the target surface
- the compound  $\theta_s$  and metal fractions on the substrate surfaces
- the metal concentration  $n_M$  in the target subsurface region
- the compound concentration in the target subsurface region which is directly derived from  $n_M$
- the non-reacted implanted reactive gas concentration  $n_R$  in the target subsurface region
- the consumptions  $Q_t$  of reactive gas by the target
- the consumptions  $Q_s$  of reactive gas by the substrate
- the amount of reactive gas  $Q_p$  pumped away by the vacuum pump
- the amount of reactive gas  $Q_{in}$  introduced into the vacuum chamber

To calculate these variables, the RSD model needs several input variables



Fig.2.3. RSD2013

To run a first RSD simulation, you just double click the GUIexecutable RSD2013\_GUI.exe. By default a complete input is specified in the window tabs Method, Chamber, Target, Substrate and Output

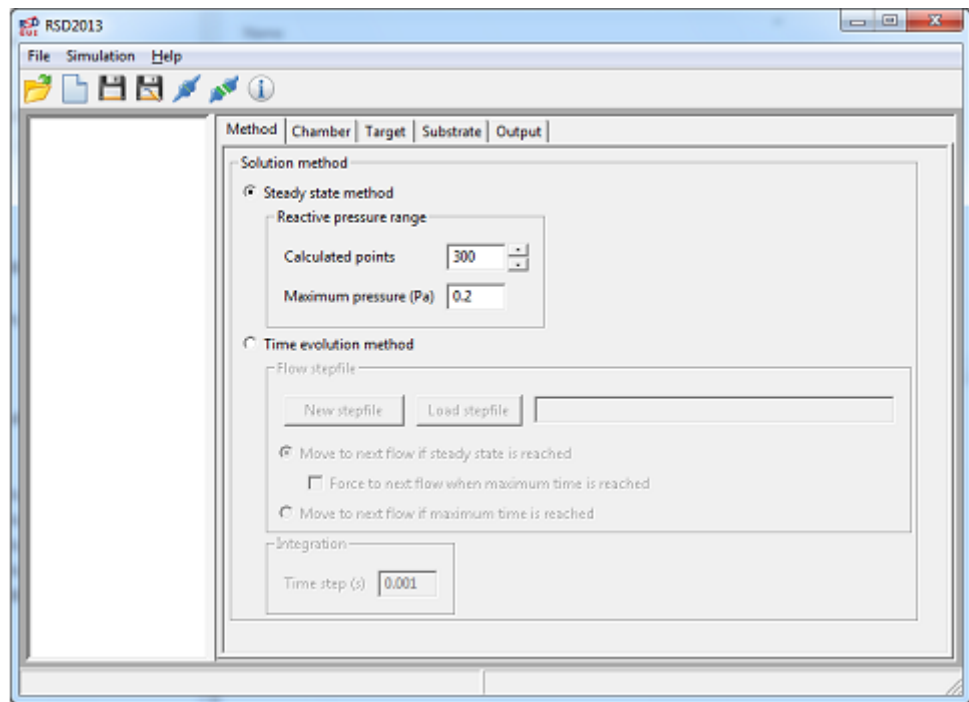



Fig.2.4. Default input

To run this default simulation, you first have to save the simulation input. By choosing File> Save as ...in the menu bar or pressing on the icon , a window pops up to specify a saving location and a name for the main input file. Choose as location the INPUT directory under the RSD program folder, and as name, for example, my\_first\_simulation.in. Press the Save button. Two input files will be created, namely my\_first\_simulation.in and my\_first\_simulation\_OutputSpecs.in. The first file is the main input file, while the second file is the input file specifying the generated output.

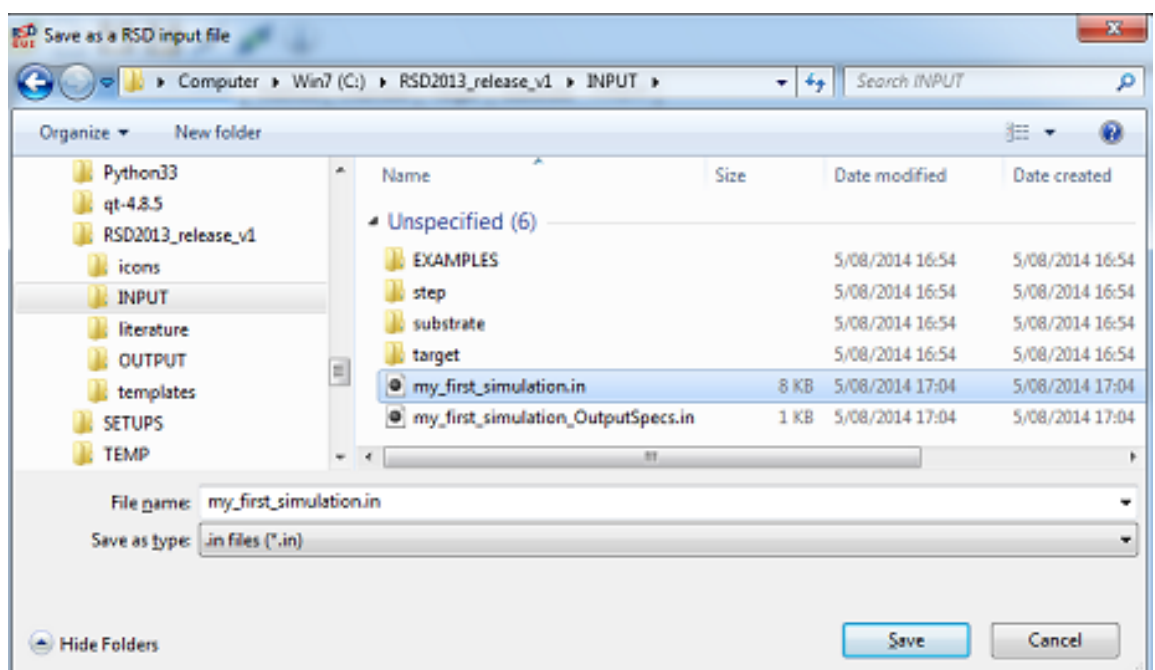


Figure 2.5 Saving input main file

To run the simulation of this selected input file, choose in the menu bar *Simulation*> *Run selected* or press on the icon . If everything goes well, a command window pops up, showing the progress of the simulation which closes itself on the end of the simulation.

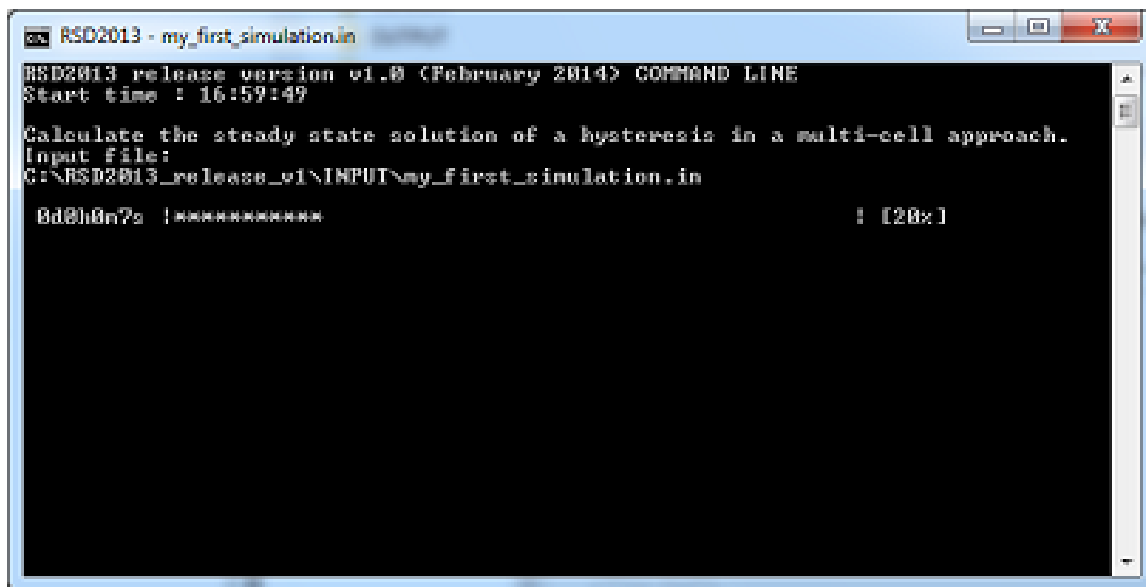


Figure .2.6 Running simulation.

To look at the simulation results you have to know where the output files are saved. To check this, go to the window tab Output. In the first text field next to the button Choose, the location where the output files are saved is given. By default the output location is the RSD program folder. The text field underneath gives the prefix string with which every output file will start. By default this string is the name of the main input file. Browsing to the output file location with Windows explorer, you will see two output files recognizable by the extension .out. The file ending with *summary.out* is always generated. This file is updated during the simulation run and shows the progress of the simulation as given by the command window. At the end of the simulation it gives the elapsed time for this simulation run and its ending time. The other file ending with *hyst\_steady.out* contains the simulation results.

As this is a steady state simulation, the reactive gas pressure (second column) is increased up to the value 0.2 as specified in field Maximum pressure (Pa) in the window tab Method, and subsequently decreased. The total number of pressure values that are



calculated, by default 300, is specified by the field Calculated points under the same window tab Method. The columns of this output file with the steady state solution gives the results of the following variables:

1. Q\_in : flow of reactive gas introduced in the vacuum chamber
2. P\_O2 : pressure of reactive gas
3. theta\_s : spatial averaged compound fraction on substrate surface
4. theta\_m : spatial averaged metal fraction on target surface
5. theta\_c : spatial averaged chemisorbed fraction on target surface
6. theta\_r : spatial averaged compound fraction on target surface
7. theta\_mb : spatial averaged metal fraction of target subsurface layer
8. Q\_p : reactive gas flow pumped away by the vacuum pump
9. Q\_s : reactive gas flow consumed by compound formation on the substrate
10. Q\_t : reactive gas flow consumed (or released) by the target

Q_in[pscm]	P_O2[Pa]	theta_s	theta_m	theta_c	theta_r	theta_mb	Q_p[pscm]	Q_s[pscm]	Q_t[pscm]
0.0250166	4.00048e-005	0.00918003	0.997331	0.000230829	0.000418722	0.999995	0.00107637	0.0237574	0.00012229
0.48701	0.000930763	0.179244	0.984436	0.00374236	0.00940206	0.990594	0.0250442	0.487725	0.00424071
0.819501	0.00182354	0.305521	0.949546	0.0110919	0.0193617	0.980699	0.049119	0.762079	0.00850502
1.06905	0.0027243	0.397781	0.934599	0.0162975	0.0291034	0.969946	0.0733014	0.983354	0.0123707
1.26221	0.00362708	0.471166	0.920609	0.0213375	0.0390337	0.959372	0.0973923	1.14817	0.0164431
1.41529	0.00453393	0.531461	0.907471	0.02627	0.0491393	0.949726	0.1219923	1.27287	0.0205276
1.53919	0.00544483	0.580182	0.89548	0.0310331	0.0594871	0.940323	0.146302	1.368	0.0246196
1.64037	0.00635939	0.622034	0.884331	0.0356444	0.0700244	0.932226	0.171123	1.44072	0.0287227
1.72472	0.00727907	0.657103	0.873119	0.0401023	0.0807736	0.924933	0.195833	1.49402	0.0328287
1.79417	0.00820242	0.687249	0.862329	0.0444038	0.0917374	0.918337	0.220499	1.5373	0.0369493
1.83439	0.00912396	0.712499	0.852434	0.0483444	0.102399	0.912468	0.245434	1.56732	0.0411143
1.90498	0.0100817	0.733823	0.84303	0.0523279	0.114432	0.907332	0.270727	1.58897	0.0453324
1.9675	0.0110978	0.750938	0.834244	0.0563321	0.128322	0.903033	0.296312	1.60232	0.04947
1.98408	0.0118881	0.77411	0.825433	0.0603974	0.13337	0.901136	0.321212	1.60918	0.0536821
2.01316	0.0128827	0.791414	0.783841	0.0634434	0.130713	0.90133	0.346629	1.61082	0.0579187

Figure 2.7 Example of output file.

The RSD 2013 program has two methods. These are: steady-state and time-evolution method.

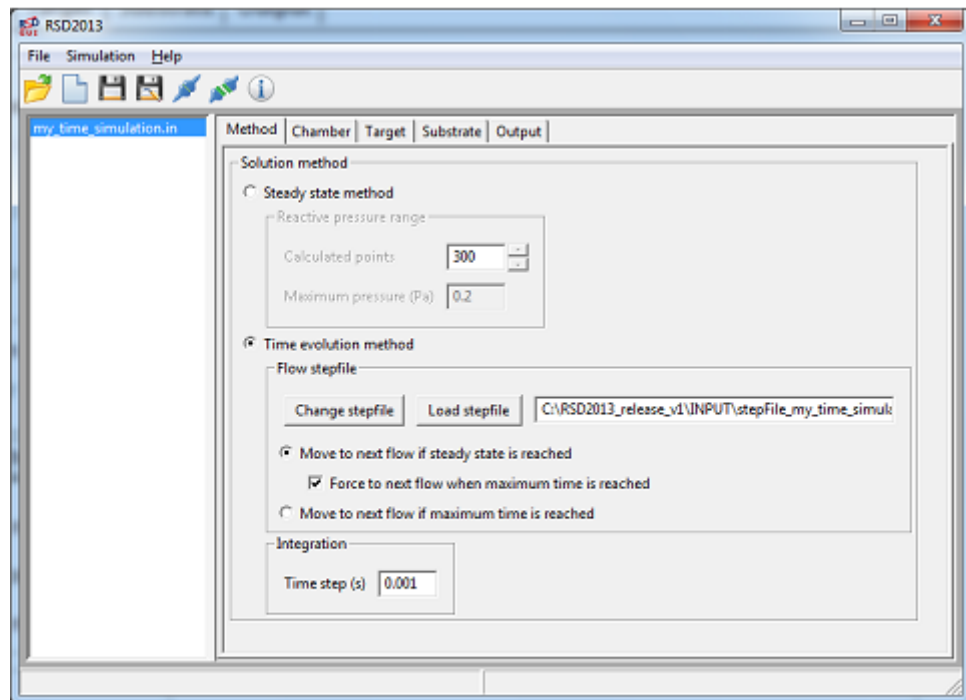


Figure 2.8 Window tab method

To solve the RSD2013 model in its steady state description. The reactive pressure  $P_r$  is stepwise increased up to the Maximum pressure and subsequently decreased. The total number of reactive pressure  $P_r$  values that are calculated are given by the field Calculated points.

To solve the RSD2013 model in its time description. The reactive sputter system is evolved in time defined by a given reactive flow  $Q_{in}$ . The time evolution of these reactive flows  $Q_{in}$  is defined by the so called step file, which is an included input file. The step file is an included input file and defines the evolution of the reactive flow  $Q_{in}$  for the time evolution method. The button New stepfile opens the window Creating step file where a new step file can be composed.

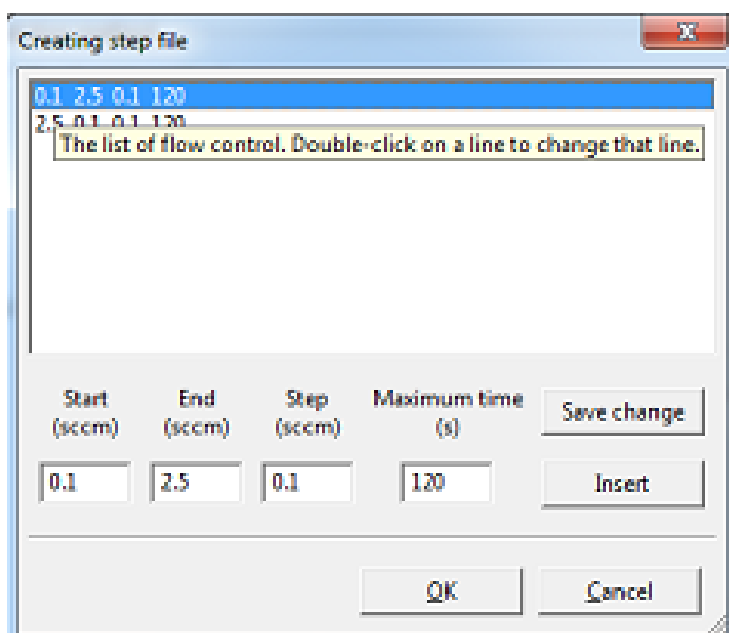


Figure 2.9 Creating step file window

The window tab Chamber specifies the parameters connected to the gases in the chamber and the operation conditions.

Parameters in the model

Table 2.1

Parametr	Description
$Y_m, Y_c, Y_r$	Sputter yield of metal particles compound particles, chemisorbed particles
$\alpha_t, \alpha_s$	Sticking coefficient of reactive gas on metal for the target, substrate surface
$k$ ( $\text{cm}^3\text{c}^{-1}$ )	reaction rate coefficient of implanted reactive atoms with metal particles
$\beta$ ( $\text{ион}^{-1}$ )	Knock-on yield of chemisorbed reactive atoms R

$n_0$ (cm <sup>-3</sup> )	Particle density
$n_{0,s}$ (cm <sup>-2</sup> )	Particle surface density
$z$	Stoichiometric factor
$I_{tot}$ (ион с <sup>-1</sup> )	Ion current
$P_i$ (Па)	Inert gas pressure
$S$ (cm <sup>3</sup> с <sup>-1</sup> )	Pumping speed