



Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Исследование структурно-фазового состояния продуктов коррозии, формируемых на поверхности стальных материалов</b>

УДК : 620.193:539.211:669.14

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б92	Чжун Ханьлинь		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И. В.	к.т.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОКД, ИШНКБ	Сечин А. И.	д.т.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель специализации наноструктурные материалы	Лямина Г.В.	к.х.н		

## Результаты обучения по направлению

### 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-4), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 2.5, 4.1, 4.2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2), <i>CDIO Syllabus</i> (2.2, 4.2), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-8, ПК-11), <i>CDIO Syllabus</i> (3.2, 4.4, 4.8)
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-18), <i>CDIO Syllabus</i> (4.2, 4.3, 4.7, 4.8)
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.1, 3.2, 3.3), Критерий 5 АИОР (п. 2.9, 2.11), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FЗадачи...EANI</i>
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий	Требования ФГОС (ПК-3, 4, 6, 7, 11, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4), <i>CDIO Syllabus</i> (1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.4, 4.4), Критерий 5 АИОР (п. 2.3, п. 2.8), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-10, ПК-14), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 2.4, 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ОК-7), <i>CDIO Syllabus</i> (2.4), Критерий 5 АИОР (п. 2.14), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство	Требования ФГОС (ОК-8, ОК-9, ПК-12, ОПК-5), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1, 4.3, 4.4, 4.6, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 2.12), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов	Требования ФГОС (ПК-19), <i>CDIO Syllabus</i> (4.3, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
Г.В. Лямина  
 (Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)                      (Дата)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
--

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
154Б92	Чжун Ханьлинь

Тема работы:

<b>Исследование структурно-фазового состояния продуктов коррозии, формируемых на поверхности стальных материалов</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 61-8/с от 02.03.2023
Срок сдачи студентом выполненной работы:	5 июня 2023 года

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	Исследование морфологии поверхности, фазового состава и количественного соотношения продуктов коррозии, формируемых на образцах стали Ст3 до и после нанесения на их поверхность ингибитора в виде акрилового лака с добавлением наночастиц ZnO в кислой среде.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Провести коррозионные испытания образцов конструкционной стали марки Ст3 в водном растворе смеси кислот HNO <sub>3</sub> +HCl; 2. Исследовать морфологию поверхности образцов конструкционной стали Ст3 до и после коррозионных испытаний; 3. Провести качественный и количественный рентгенофазовый анализ продуктов коррозии исследуемых образцов стали Ст3 до и после нанесения ингибитора

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук И. В., доцент, к.т.н
Социальная ответственность	Сечин А. И., профессор ОКД, ИШНКБ, д.т.н

**Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику**

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
154Б92	Чжун Ханьлинь		

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

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
154Б92		Чжун Ханьлинь	
<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение Школа</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов
<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>			
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих		Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов		Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования		Отчисления во внебюджетные фонды 30 %	
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>			
1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)		Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ	
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)		Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования	
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)		Расчет бюджетной стоимости НИ	
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)		Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.	
<b>Перечень графического материала</b>			
1. Оценка конкурентоспособности ИР 2. Матрица SWOT 3. Диаграмма Ганта 4. Бюджет НИ 5. Основные показатели эффективности НИ			
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>			

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б92	Чжун Ханьлинь		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
154Б92		Чжун Ханьлинь	
<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение Школа</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

<b>Исследование структурно-фазового состояния продуктов коррозии, формируемых на поверхности стальных материалов</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: продукты коррозии стали Ст3 до и после нанесения на ней поверхности ингибитора в виде акрилового лака с добавлением наночастиц ZnO в кислой среде.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197ФЗ (ред. от 09.03.2021). ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения); ГОСТ Р 12.0.001-2013 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Основные положения. ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Отклонение показателей микроклимата. 2. Превышение уровня шума. 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны. 4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. 5. Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Негативное воздействие на окружающую среду: контакт наночастиц с организмом человека и естественной биотой вследствие попадания в атмо-, гидро- и литосферу при превышении ПДК. Утилизация люминесцентных ламп и макулатура.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Авария, взрыв, пожар
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Сечин Александр Иванович	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б92	Чжун Ханьлинь		

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
Отделение школы Отделение материаловедения  
Уровень образования: бакалавриат  
Период выполнения: весенний семестр 2021/2022 учебного года  
Форма представления работы:

**Бакалаврская работа**

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:		09.06.2023 г.
Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.03.2021	1. Литературный обзор по теме бакалаврской работы	20
15.04.2021	2. Выполнение эксперимента по теме работы	20
15.05.2021	3. Обсуждение результатов и оформление работы	35
10.05.2021	Финансовый менеджмент	15
10.05.2021	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОМ	Божко И.А.	К.ф.-М.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.02 Материаловедение и технологии материалов	Лямина О.В.	к.х.н., доцент		

## Реферат

**Выпускная квалификационная работа** состоит из 82 страницы печатного текста, содержит 14 рисунков, 23 таблицы и 18 источников использованной литературы.

**Ключевые слова:** коррозия металлов, рентгенофазовый анализ, продукты коррозии, ингибиторы коррозии, наночастицы ZnO.

**Объектами исследования являются:** образцы конструкционной стали марки Ст 3, до и после нанесения ингибитора.

**Методы исследования:** метод оптической микроскопии, рентгенофазовый анализ.

**Работа посвящена** исследованию морфологии поверхности, фазового состава и количественного соотношения продуктов коррозии, формируемых на образцах стали Ст3 до и после нанесения на их поверхность ингибитора в виде акрилового лака с добавлением наночастиц ZnO в кислой среде. По данным РФА установлено, что продукты коррозии образца стали Ст3 без ингибитора представляют собой карбид железа Fe<sub>3</sub>C. В случае образцов стали марки Ст3 после нанесения на их поверхность акрилового лака и акрилового лака с наночастицами ZnO обнаружено, что основными продуктами коррозии при воздействии водного раствора смеси кислот HNO<sub>3</sub> и HCl являются метагидроксиды железа: β-FeO(OH), α-FeO(OH), γ-FeO(OH). Количественный рентгенофазовый анализ позволил установить, что в поверхностных слоях образца стали Ст3 с акриловым лаком после коррозионных испытаний в кислой среде объемная доля α-Fe составляет 42 масс.%, а объемная доля β-, α- и γ-FeO(OH) – 35, 19 и 4 масс. %, соответственно. Добавление в акриловый лак наночастиц ZnO при выдержки образцов стали Ст3 в кислой среде приводит к значительному снижению объемной доли α-Fe до 17 масс.% с одновременным увеличением содержания β- и α-оксигидроксидов железа до 46 и 35 масс. %, соответственно. При этом объемная доля γ-Fe(OH) практически не изменилась и составила около 2 масс.%.

## Список условных сокращений

**НЧ** – наночастицы

**СЭМ** – сканирующий электронный микроскоп

**РЭМ** – растровый электронный микроскоп

**РФА** – рентгенофазовый анализ

**ГОСТ** – государственный стандарт

**ВКР** – выпускная квалификационная работа



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	13
1.1 Основные понятия коррозии металлов и способы защиты от неё.....	13
1.2. Применение наночастиц ZnO в качестве ингибитора коррозии.....	18
углеродистых сталей.....	18
2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	31
2.1. Объекты исследования .....	31
2.2 Рентгенофазовый анализ .....	32
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	33
3.1. Морфология поверхности образцов стали Ст3 .....	33
3.2. Фазовый состав продуктов коррозии на поверхности стали Ст3 .....	35
4.ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	42
4.1. С точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценить бизнес-потенциал и перспективы научных исследований .....	43
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	43
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	44
4.1.3 Технология QuaD .....	46
4.1.4 SWOT-анализ.....	47
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	52
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	52
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	53
4.3 Бюджет научно-технического исследования .....	58
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....	59
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования.....	59

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	60
4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	62
4.3.5. Накладные расходы.....	62
4.3.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	63
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	64
4.5 Выводы по разделу.....	67
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	69
5.1 Введение.....	69
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	70
5.3 Производственная безопасность.....	71
5.4 Анализ вредных производственных факторов.....	72
5.5 Анализ опасных производственных факторов.....	75
5.6 Экологическая безопасность.....	77
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	78
5.8 Выводы по разделу.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	801

## ВВЕДЕНИЕ

Железоуглеродистые сплавы или точнее сказать углеродсодержащие стали, представляют собой материал, который достаточно давно и широко применяется во многих областях промышленности, таких как транспорт, строительство, медицина, нефтяная промышленность и т.д. В процессе эксплуатации стальные изделия подвергаются воздействию окружающей среды или других более агрессивных реагентов, в результате чего на их поверхности протекают различные химические или электрохимические процессы, приводящие к коррозии материала. Например, во многих металлургических и нефтеперерабатывающих заводах для травления металлов и очистки их поверхности используют соляную кислоту, высокая концентрация которой вызывает сильнейшую коррозию стальных конструкций. В результате происходит сильная деградация поверхности стальных изделий с одновременной потерей их механической прочности, что может привести к полному разрушению конструкции.

Защита стали от коррозии является одной из актуальных проблем промышленности. В настоящее время разработано множество методов защиты стали от коррозионных процессов, таких как гальваника, покраска и нанесение покрытий и т.д. В настоящее время считается, что одним из перспективных и экономически оправданных способов защиты металлических изделий от процессов коррозии является использование ингибиторов на основе многофункциональных органических соединений, с помощью которых возможно эффективное подавление коррозионных процессов. Добавление наночастиц, как правило, повышает эффективность использования органических ингибиторов. Одним из наиболее перспективных материалов является ZnO благодаря своей термической и механической стабильности при комнатной температуре в дополнение к хорошей физической и химической стабильности и низкой стоимости. Однако результаты исследования фазового состава продуктов коррозии стали и влияния ингибиторов коррозии на ее микроструктуру и фазовый состав в литературе отсутствуют.

**Цель работы:** исследование морфологии поверхности, фазового состава и количественного соотношения продуктов коррозии, формируемых на образцах стали Ст3 до и после нанесения на их поверхность ингибитора в виде акрилового лака с добавлением наночастиц ZnO в кислой среде.

**Задачи работы:**

1. Провести коррозионные испытания образцов конструкционной стали марки Ст3 в водном растворе смеси кислот  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ ;
2. Исследовать морфологию поверхности образцов конструкционной стали Ст3 до и после коррозионных испытаний;
3. Провести качественный и количественный рентгенофазовый анализ продуктов коррозии исследуемых образцов стали Ст3 до и после нанесения ингибитора

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Основные понятия коррозии металлов и способы защиты от неё

Коррозия представляет собой естественный процесс, который возникает в результате взаимодействия металлов с окружающей средой, что приводит к деградации поверхности металла и ухудшению его механических свойств, в конечном счете, к разрушению конструкции [1, 2]. Коррозионный процесс протекает на границе раздела между поверхностью металла и окружающей средой и является гетерогенным процессом. Этот процесс может быть ускорен под воздействием различных факторов, такими как высокая температура, влажность, присутствие загрязняющих веществ и воздействие агрессивных реагентов. Коррозия может проявляться в различных формах, и ее последствия могут варьироваться от незначительного изменения цвета до катастрофического разрушения, в зависимости от типа и последствий коррозии.

Чтобы предотвратить и смягчить ущерб, причиняемый коррозией, важно знать различные типы коррозии и лежащие в их основе механизмы. Зная основные признаки коррозии и применяя соответствующие меры по предотвращению и уменьшению её последствий, можно продлить срок службы металлических конструкций и оборудования, минимизировать затраты на техническое обслуживание и обеспечить безопасную и надежную их эксплуатацию. Далее остановимся подробно на рассмотрении распространенных форм коррозии.

В зависимости от характера разрушения коррозия подразделяются на две большие группы (рис 1.1) [3]: сплошная и локализованная форма коррозии. Сплошная (общая) коррозия представляет собой форму коррозии, которая поражает всю поверхность металла, в то время как другие формы поражают определенное место или участок. Этот тип коррозии обычно наблюдается в чистых металлах, которые являются однородными по элементному составу. Это очень медленная реакция, которая довольно равномерно распределяется по всей поверхности металла, подверженной

воздействию агрессивного вещества. Тот факт, что она поражает довольно большую площадь металла, что значительно облегчает ее обнаружение и, следовательно, намного менее серьезные последствия, чем локальная коррозия. Проблема равномерной коррозии заключается в том, что она приводит к образованию большого объема оксидов, которые имеют тенденцию прилипать к поверхностям теплопередачи и влиять на эффективность системы. При локализованной коррозии происходит интенсивное воздействие на локализованные участки поверхности металла, в то время как остальная его поверхность подвергается коррозии с гораздо меньшей скоростью. Локальная коррозия возникает, когда коррозия сочетается с другими разрушительными процессами, такими как напряжение, усталость, эрозия и другие формы химического воздействия.

Типы коррозии также можно классифицировать в зависимости от типа окружающей среды, в которой они происходят. Соответственно, основными типами коррозии являются атмосферная коррозия, газовая коррозия, жидкостная коррозия (в пресной воде, в морской воде и т.д.), коррозия в почвах, биокоррозия и т.д.

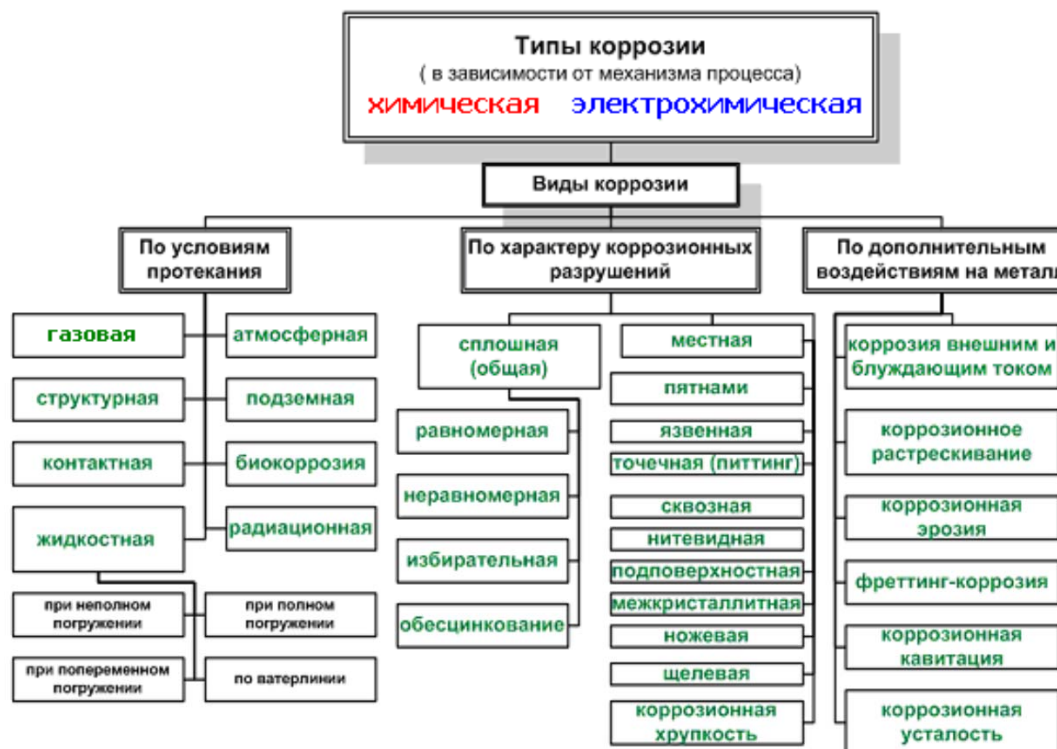


Рис. 1.1 – Классификация коррозионных процессов

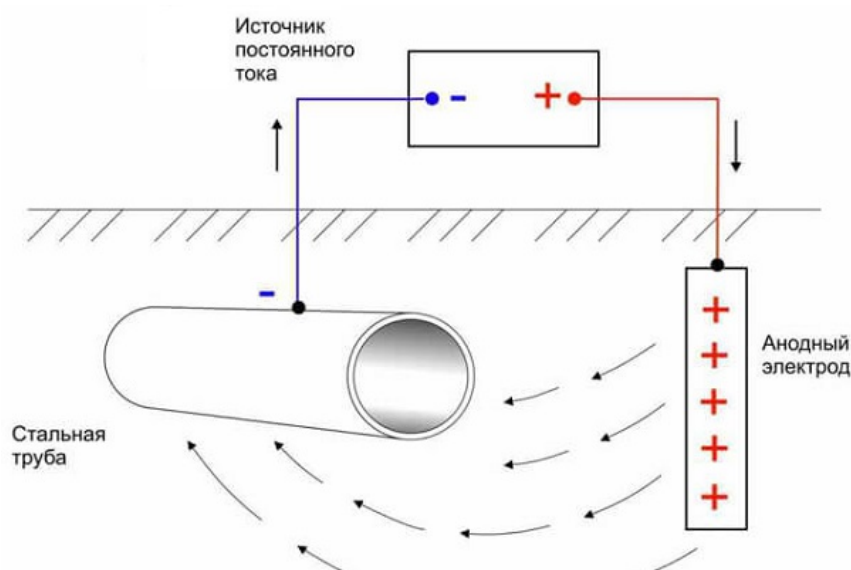
Подавление и предотвращение процессов коррозии могут быть достигнуты применением одного или комбинации трех основных механизмов защиты [4, 5]:

1. Создание эффекта барьера, который препятствует взаимодействию между металлической подложкой и агрессивной средой и, таким образом, предотвращает миграцию ионов;
2. Система катодной защиты, в которой ингибирующий материал выполняет роль расходоуемого анода;
3. Применение пассивирующих/ингибирующих компонентов, которые замедляют протекание процессов коррозии.

Одним из самых простых и дешевых способов предотвращения коррозии является использование барьерных защитных покрытий, таких как краска. Современные системы окраски представляют собой комбинацию различных слоев краски, которые выполняют разные функции. Грунтовочный слой действует как ингибитор, промежуточный слой увеличивает общую толщину краски, а финишный слой обеспечивает устойчивость к воздействию факторов окружающей среды. Самым большим недостатком покрытий является то, что их часто приходится снимать и наносить повторно. Покрытия, которые не нанесены должным образом, могут отслаиваться от поверхности защищаемого металла, что приведет к повышению степени коррозии. Кроме того, покрытия содержат летучие органические соединения, которые делают их опасными для людей и окружающей среды.

Катодная защита – это электрохимический процесс, который замедляет или останавливает коррозионные токи путем подачи постоянного тока на металл. Катодная защита работает путем помещения анода или анодов (внешних устройств) в электролит для создания контура. Ток течет от анода через электролит к поверхности конструкции. Коррозионные процессы протекают на поверхности анода, в результате чего удается остановить дальнейшую коррозию защищаемой конструкции. По сути, катодная защита соединяет основной металл, подверженный риску (сталь), с расходоуемым металлом, который подвергается коррозии вместо основного металла.

Существует два основных типа катодной защиты: гальваническая и катодная защита с принудительным током. Гальваническая защита заключается в нанесении защитного цинкового покрытия на сталь для предотвращения коррозии. В результате цинк корродирует вместо герметизированной стали. Срок службы этих систем ограничен, поскольку расходуемый анод, защищающий основной металл, будет продолжать разрушаться с течением времени до тех пор, пока полностью не разрушится. Современные системы катодной защиты состоят из анодов, подключенных к источнику питания, который обеспечивает постоянный поток электроэнергии. Метод защиты с расходуемым анодом использует металл, более активный, чем основной металл, для «жертвования» ионов в раствор. Эти «расходуемые аноды» (обычно из таких сплавов, как магний, алюминий или цинк) обладают более высоким электрохимическим потенциалом. Этот метод часто может обеспечить гораздо более длительную защиту, чем расходуемый анод, поскольку анод питается от неограниченного источника питания. Но несмотря на высокую эффективность катодной защиты, аноды изнашиваются и их необходимо часто проверять и / или заменять, что может привести к увеличению затрат на техническое обслуживание таких конструкций. Они также увеличивают вес защищаемой конструкции и не всегда эффективны в средах с высоким сопротивлением.



1.2 – Схема, иллюстрирующая принцип функционирования катодной защиты



Еще одним эффективным методом предотвращения коррозии является применение ингибиторов [5]. Ингибиторы коррозии – это химические вещества, которые вступают в реакцию с поверхностью металла или с элементами окружающей среды, вызывающими коррозию, тем самым прерывая химическую реакцию, вызывающую коррозию. Ингибиторы могут действовать, адсорбируясь на поверхности металла и образуя защитную пленку. Эти вещества могут наноситься в виде раствора или в качестве защитного покрытия методом диспергирования.

Процесс замедления коррозии ингибитором зависит от:

1. Изменение характеристик анодной или катодной поляризации
2. Уменьшение диффузии ионов к поверхности металла
3. Повышение электрического сопротивления поверхности металла
4. Ингибиторы можно классифицировать, как показано на рис. 1.3.

Выделяют два основных класса: неорганические и органические. Анодный тип неорганических ингибиторов включает хроматы, нитриты, молибдаты и фосфаты, а катодный тип включает цинковые и полифосфатные ингибиторы. Класс пленкообразователей является основным классом органических ингибиторов, поскольку он включает амины, соли аминов и имидазолины - бензоат натрия, меркаптаны, сложные эфиры, амины и производные аммиака. Ингибиторы также можно классифицировать на основе их функций. Например, хроматы и нитраты называются пассивирующими ингибиторами из-за их тенденции пассивировать поверхность металла. Некоторые ингибиторы, такие как силикаты, ингибируют как анодные, так и катодные реакции. Они также удаляют из системы нежелательные взвешенные частицы, такие как частицы железа, путем осаждения. Некоторые типы ингибиторов делают окружающую среду щелочной, чтобы предотвратить коррозию. Такие ингибиторы в газовой фазе называются «парофазными ингибиторами» и состоят из гетероциклических соединений, таких как циклогексиламин. Эти ингибиторы используются в упаковочных ящиках при морской транспортировке.

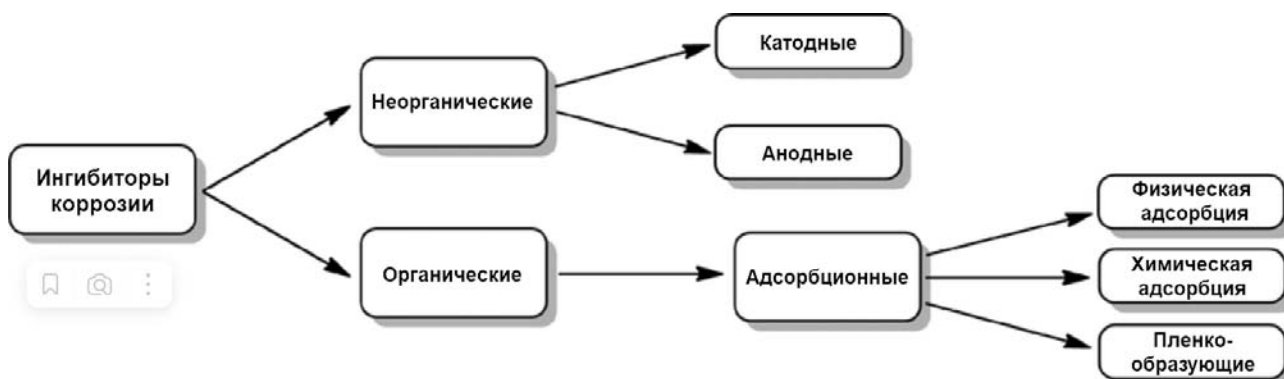


Рисунок 1.3 – Классификация ингибиторов коррозии

Одним из уникальных преимуществ данного способа защиты металлов от коррозии является то, что добавление ингибитора может быть осуществлено без нарушения процесса. Ингибиторы коррозии выбираются на основе растворимости или диспергируемости в жидкостях, которые должны быть ингибированы. Ингибиторы коррозии используются в разведке и добыче нефти и газа, на нефтеперерабатывающих заводах, в химическом производстве, тяжелой промышленности, при очистке воды и производстве добавок к продуктам.

## 1.2. Применение наночастиц ZnO в качестве ингибитора коррозии углеродистых сталей

Работа [6] посвящена разработке нового улучшенного покрытия на основе эпоксидной смолы с добавлением нанопорошка оксида цинка с целью повышения коррозионной стойкости низкоуглеродистой стали. В рамках этого исследования изучали коррозионное поведение оксида цинка в различных средах путем измерения скорости коррозии образцов низкоуглеродистой стали. Были изучены механизмы коррозионного поведения низкоуглеродистой стали в растворах HCl и NaOH.

В качестве объектов исследования использовали образцы из низкоуглеродистой стали, на поверхность которых было нанесено защитное покрытие на основе эпоксидной смолы с добавлением нанопорошка оксида цинка. Перед нанесением защитного покрытия поверхность образцов была отшлифована и отполирована с помощью ручной шлифовальной машины. Затем образцы промыли в дистиллированной воде и высушили ацетоном для удаления следов воды с целью предотвращения преждевременной коррозии.

После нанесения защитного покрытия на одну из поверхностей образцов низкоуглеродистой стали была нанесена специальная метка «X», что позволило локально удалить защитное покрытие. Коррозионные испытания проводили путем погружения исследуемых образцов в одну из двух сред: соляная кислота HCl и гидроксид натрия NaOH. Время выдержки образцов низкоуглеродистой стали в каждой из исследуемых сред составляло 24 часа и 60 дней. Перед проведением коррозионных испытаний исследуемые образцы взвешивали для возможности контролировать потерю веса образцов в ходе испытаний. В среднем, вес каждого исследуемого образца составлял около 260 гр. при размерах 70 мм×70 мм×7 мм.

На рисунке 1.4 представлен внешний вид поверхности образцов низкоуглеродистой стали после выдержки их в растворе HCl. Видно, что на поверхности образцов низкоуглеродистой стали в результате воздействия раствора HCl наблюдаются серьезные последствия коррозионных процессов, в результате протекания которых в области метки «X» образуется толстый слой ржавчины красно-коричнево цвета. Кроме того, распространение продуктов коррозии не было равномерным по метке «X» на поверхности исследуемых образцов, так как некоторые области были покрыты ржавчиной красного цвета, в то время как другие области были черными. В наибольшей степени неравномерность формируемого слоя продуктов коррозии наблюдается для образцов низкоуглеродистой стали с защитным покрытием, в котором содержание наночастиц ZnO составляет 0 масс. % (рис.1.4а) или 1 масс. % (рис.1.4б). Наибольшую коррозионную стойкость в растворе HCl демонстрируют образцы низкоуглеродистой стали с защитным покрытием, содержащим 4 масс. % наночастиц ZnO, о чем свидетельствует наименьшее количество формируемых продуктов коррозии на поверхности образца (рис.1.4д). Эти данные подтверждают также результаты коррозионных испытаний, согласно которым в данном случае наблюдается наименьшая потеря веса, и следовательно, минимальная скорость коррозионного процесса, которая составляет  $1,72 \cdot 10^{-3}$  мм/год.

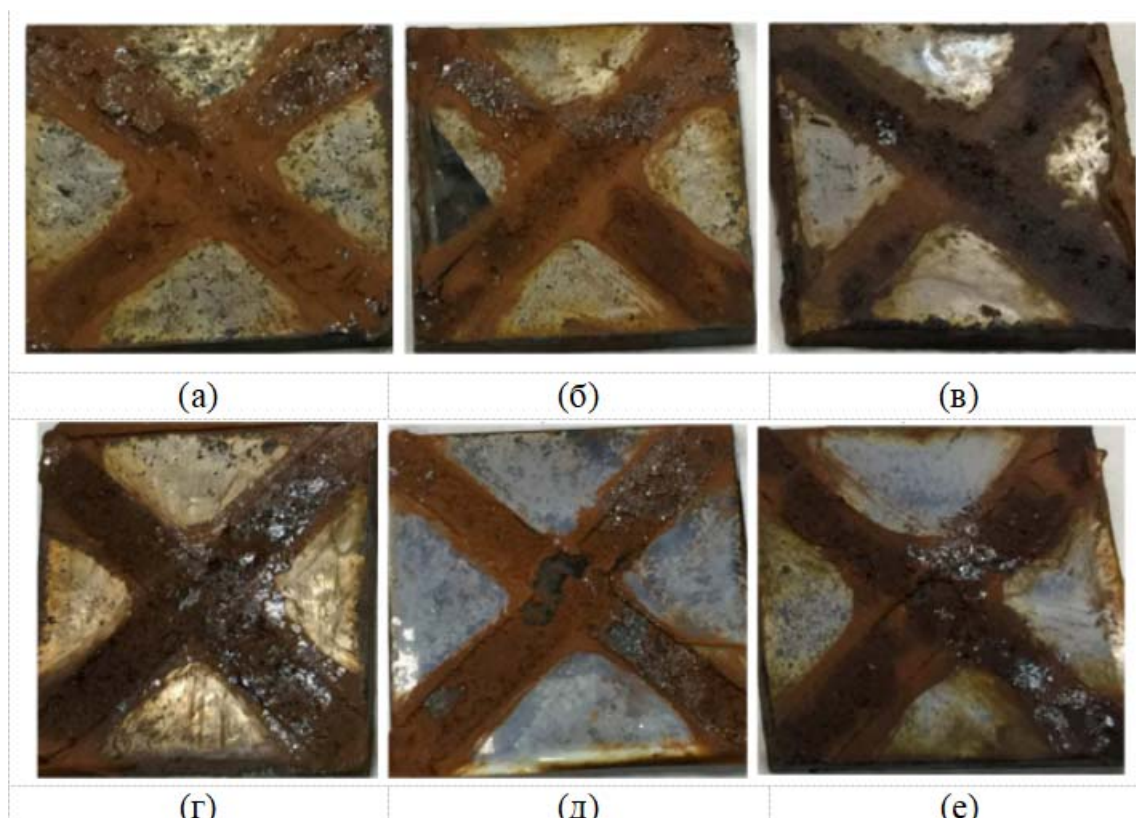


Рисунок 1.4 – Изменение внешнего вида образцов низкоуглеродистой стали при коррозионных испытаниях в растворе HCl в зависимости от состава защитного покрытия:

а – ZnO (0 масс. %); б – ZnO (1 масс. %); в – ZnO (2 масс. %); г – ZnO (3 масс. %); д – ZnO (4 масс. %); е – ZnO (5 масс. %)

На рисунке 1.5 показано влияние раствора NaOH на деградацию поверхности образцов низкоуглеродистой стали. В отличие от раствора HCl, подложка из низкоуглеродистой стали после воздействия раствора NaOH оставалась достаточно чистой и не имела явных признаков коррозии. Однако образцы из низкоуглеродистой стали после выдержки в растворе NaOH испытывают наибольшую потерю веса и имеют самое высокое значение скорости коррозии, которая составляет  $1,92 \cdot 10^{-3}$  мм/год в случае защитного покрытия, не содержащего наночастицы ZnO. Авторы работы [6] считают, что эти явления могут быть связаны с потерей силы сцепления между защитным покрытием и подложкой из низкоуглеродистой стали. По-видимому, раствор NaOH влияет на эпоксидное покрытие, а не на саму стальную подложку [7]. По прошествии нескольких дней эпоксидное покрытие в среде NaOH становится

более тонким по сравнению с первоначальной толщиной покрытия при его непосредственном нанесении на стальную подложку. Кроме того, защитные покрытия начинали трескаться и отслаиваться от подложки, что способствовало большой потере веса в процессе коррозионных испытаний. Добавление 2 мас.% и 3 мас.% наночастиц ZnO к эпоксидному защитному покрытию улучшает силу сцепления между эпоксидным покрытием и стальной подложкой. Это покрытие является самым долговечным по сравнению с другими составами покрытий.

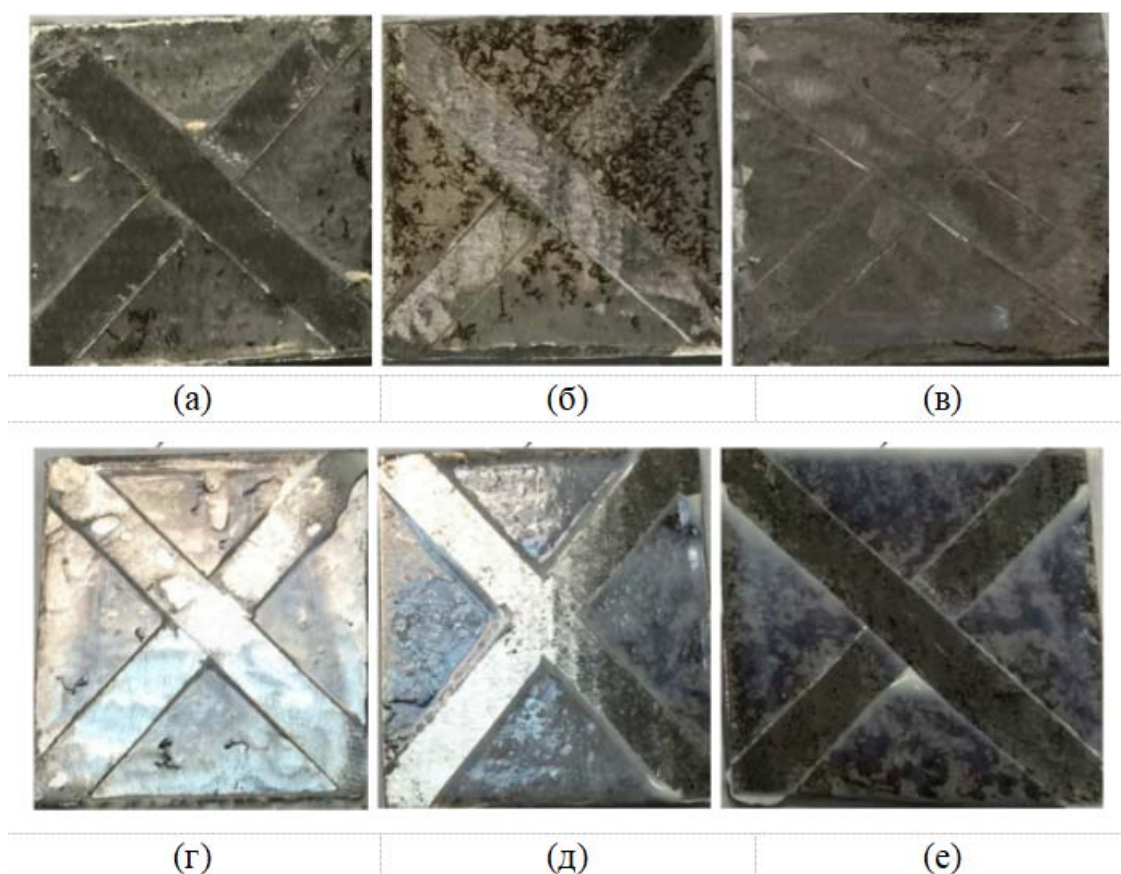


Рисунок 1.5 – Изменение внешнего вида образцов низкоуглеродистой стали при коррозионных испытаниях в растворе NaOH в зависимости от состава защитного покрытия:

а – ZnO (0 масс. %); б – ZnO (1 масс. %); в – ZnO (2 масс. %); г – ZnO (3 масс. %); д – ZnO (4 масс. %); е – ZnO (5 масс. %)

Таким образом, по данным коррозионных испытаний было установлено, что для образцов низкоуглеродистой стали наиболее агрессивной средой является кислая среда по сравнению с щелочной средой. Добавление наночастиц ZnO к защитному покрытию из эпоксидной смолы позволяет

снижать скорость протекания коррозионных процессов и предотвращать формирование продуктов коррозии на поверхности исследуемых образцов. Кроме того, различное содержание наночастиц ZnO в защитном покрытии демонстрирует разное влияние на характер протекания коррозионных процессов на поверхности стальных образцов при воздействии агрессивных сред разной природы.

В работе авторов [8] была изучена эффективность использования в качестве ингибитора коррозии углеродистой стали в 1 М растворе HCl наночастиц оксида цинка (ZnO-NPs), синтезированных с использованием экстракта листьев вьюнка полевого и  $ZnCl_2$ . Для проведения коррозионных испытаний использовали образцы углеродистой стали марки API X65 от SABIC (Саудовская Аравия). Образцы были нарезаны в виде цилиндров диаметром 1 см. Затем они были отполированы наждачной бумагой марок 800, 1000 и 1500, очищены ацетоном, промыты дистиллированной водой и высушены.

Для синтеза наночастиц ZnO использовали экстракт из листьев вьюнка полевого (5 мл), к которому добавляли 45 мл  $ZnCl_2$  ( $C=0,1$  М) и NaOH ( $C=0,5$  М). Раствор перемешивали в течение 30 мин при 50 °С, что привело к изменению его цвета, подтверждая образование ZnO-NPs. Затем его отделяли от раствора с помощью центрифуги и высушивали.

При проведении коррозионных испытаний в качестве агрессивной среды использовали 1М раствор HCl, который получали путем разбавления 37% HCl дистиллированной водой. Затем к полученному 1М раствору HCl объемом 100 мл добавляли 300 мг порошка ZnO-NPs и выдерживали в виде исходного раствора ( $pH=2,10$ ). Все коррозионные испытания исследуемых образцов проводились с использованием 1М раствора HCl, как в присутствии, так и в отсутствие ингибитора ZnO-NPs, концентрация которого варьировалась в диапазоне от 0,006 до 0,12 мг/мл. Образцы из углеродистой стали полностью погружали в 50 мл 1М раствора HCl и выдерживали в течение 3 часов при температурах 298 и 333 К. Затем образцы промыли, высушили и взвесили.

Скорость коррозии ( $C_{\text{скорость коррозии}}$ ), степень покрытия поверхности ( $\theta$ ) и эффективность ингибирования ( $E_{\text{inh}}\%$ ) были рассчитаны исходя из потери веса, используя следующие уравнения:

$$C_{\text{rate}} = \frac{W}{A \cdot t} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{W_0 - W_{\text{inh}}}{W_0} \quad (2)$$

$$E_{\text{inh}} = \frac{(W_0 - W_{\text{inh}})}{W_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

$W$  – потеря веса углеродистой стали,  $A$  ( $\text{см}^2$ ) – площадь образцов,  $t$  (h) – время погружения, а  $W_0$  и  $W_{\text{inh}}$  – потери в весе (мг) углеродистой стали.

После выдержки образцов углеродистой стали в 1М растворе HCl в течение 3 ч при комнатной температуре морфологию ее поверхности также исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа модели JSM-6380 LA с разрешением 3,0 нм при ускоряющем напряжением 0,5-30 кВ. Для оценки эффективности ингибитора были применены методы измерения потери веса как в отсутствие, так и в присутствии ZnO-NPs разной концентрации. Электроды из углеродистой стали погружали на срок до 3 часов при температурах 298 и 333 К.

На рисунке 1.6 показано, что эффективность ингибирования и степень покрытия поверхности повышаются с увеличением концентрации ингибитора и становятся стабильными при концентрации ингибитора 0,06 мг/мл.

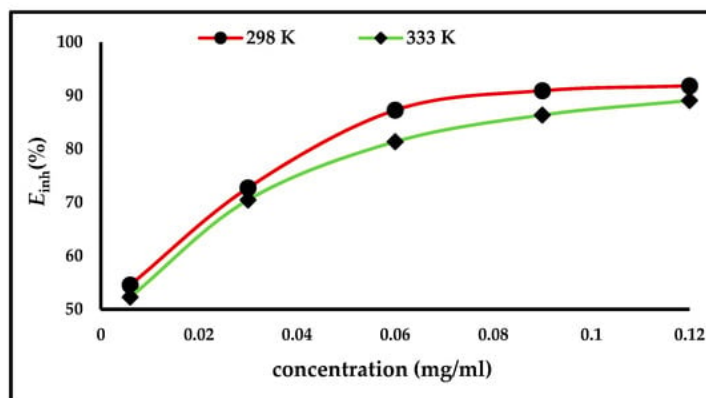


Рисунок 1.6 – Влияние концентраций ZnO-NPs на эффективность ингибирования ( $E_{\text{inh}}\%$ ) углеродистой стали в 1М растворе HCl при 298 и 333 К

Результаты в таблице 1.2 демонстрируют, что анодные и катодные реакции контролируются молекулами ингибитора, адсорбируемыми на активных центрах поверхности углеродистой стали; таким образом, поверхность насыщается ZnO-NPs, образуя защитный слой, который предотвращает продолжение коррозии [9].

Таблица 1.2 – Влияние концентраций ZnO-NPs на скорость коррозии ( $C_{rate}$ ) и эффективность ингибирования ( $E_{inh}$ %) углеродистой стали в 1М растворе HCl при 298 и 333 К

Concentration (mg/mL)	298 K			333 K		
	$C_{rate}$ (mg/cm <sup>2</sup> ·h)	$\theta$	$E_{inh}$ (%)	$C_{rate}$ (mg/cm <sup>2</sup> ·h)	$\theta$	$E_{inh}$ %
Blank	1.14	-	-	5.72	-	-
0.006	0.52	0.55	54.55	2.73	0.52	52.27
0.03	0.21	0.82	81.82	1.43	0.75	75.00
0.06	0.16	0.86	86.36	1.07	0.81	81.36
0.09	0.10	0.91	90.91	0.78	0.86	86.36
0.12	0.09	0.92	91.82	0.62	0.89	89.09

На рисунке 1.7 представлены потенциодинамические поляризационные кривые как для анодной, так и для катодной коррозии углеродистой стали по Тафелю в 1М растворе HCl в отсутствие и присутствии ингибитора различных концентраций при температурах 298 и 333 К. На снимках Тафеля показано, что добавление ингибитора влияет как на анодные, так и на катодные реакции, что приводит к выводу, что действие ингибитора ZnO-NPs носит смешанный характер. Четкое смещение анодных и катодных кривых Тафеля наблюдалось при концентрации ZnO-NPs 0,06 мг/мл и выше, что говорит о том, что в этот момент эффект ингибирования прекращается из-за насыщения поверхности углеродистой стали молекулами ингибитора [10].

Следует отметить, что по мере увеличения концентрации ингибитора скорость коррозии уменьшалась. Это означает, что ингибитор, концентрация которого составляет 0,12 мг/мл, при температуре 298 К обладает эффективностью 91%, как показано в таблице 1.3. Более высокая температура приводит к росту величины  $i_{корр}$ , но эффективность ингибитора остается на таком же высоком уровне. Так его эффективность при температуре 333 К становится постоянной при концентрации ZnO-NPs 0,06 мг/мл. Следовательно, даже при высоких температурах, когда поверхность электрода насыщена



молекулами ингибитора [ 11 ], механизм ингибирования остается эффективным. Наличие ZnO-NPS в дополнение к молекулам экстракта листьев вьюнка полевого на поверхности углеродистой стали образует защитный слой, который ограничивает анодные и катодные реакции и, таким образом, снижает скорость коррозии [12].

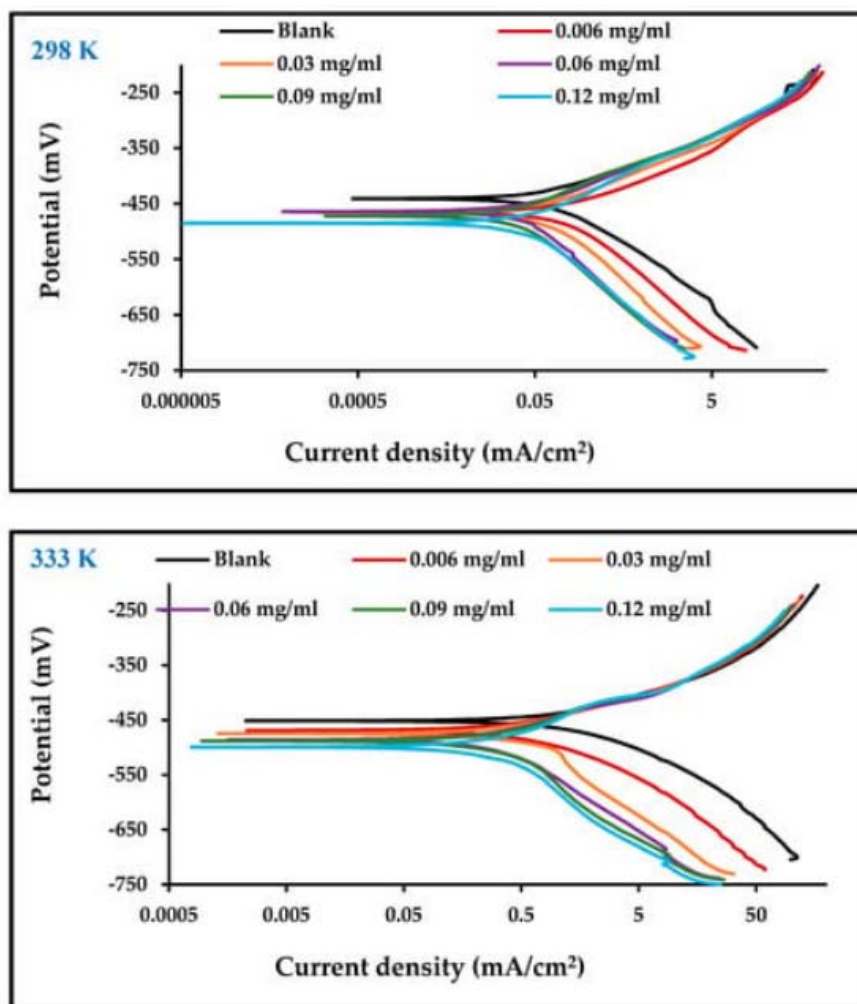


Рисунок 1.7 – Поляризационные кривые для образцов углеродистой стали после коррозионных испытаний в 1М растворе HCl с различными концентрациями ZnO-NPs при 298 К (а) и 333 К (б)

Таблица 1.3 – Параметры, определенные в результате потенциодинамических поляризационных измерений

Concentration (mg/mL)	298 K					333 K				
	$E_{corr}$ (mV)	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)	$i_{corr}$ (mA/cm²)	$E_{inh}$ (%)	$E_{corr}$ (mV)	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)	$i_{corr}$ (mA/cm²)	$E_{inh}$ (%)
Blank	-441.01	76.90	123.28	5.15	0	-451.83	109.87	150.38	9.93	0
0.006	-464.22	70.78	133.75	2.24	56.60	-468.61	91.34	147.17	4.29	58.35
0.03	-466.08	69.55	144.68	1.02	80.17	-480.03	71.25	145.87	2.37	77.02
0.06	-464.29	67.06	145.97	0.67	87.07	-486.48	67.38	143.65	1.78	82.76
0.09	-473.69	65.83	147.10	0.50	90.39	-491.62	66.73	137.29	1.39	86.55
0.12	-484.89	68.11	136.95	0.45	91.26	-511.89	64.75	132.25	1.09	89.47

Метод спектроскопии электрохимического импеданса (EIS) был использован в работе [8] для определения стабильности ZnO-NPs в зависимости от времени погружения. Метод EIS изучает стойкость электрода к коррозии без какого-либо влияния на его поведение, следовательно, он считается подходящим методом для проверки времени погружения. На рисунке 1.8 иллюстрируется реакция стали на воздействие 1М раствора HCl при температуре 298 К в присутствии ZnO-NPs с концентрацией 0,06 мг/мл при различной продолжительности погружения в данных условиях. Из рисунка 1.8 видно, что увеличение времени погружения не влияет на механизм процесса коррозии [13]. Из графиков Найквиста видно, что диаметр полукруга увеличивается с увеличением времени погружения. Основные параметры, определенные методом EIS, представлены в таблице 3, из которых ясно, что  $R_{ct}$  увеличивается с увеличением времени погружения, что указывает на снижение скорости коррозии. Таким образом, длительное время погружения увеличивает адсорбцию молекул ZnO-NPs на поверхности образцов углеродистой стали, обеспечивая ее стабильность. Было установлено, что покрытие поверхности стальных образцов стало стабильным примерно через 6 часов погружения [14].

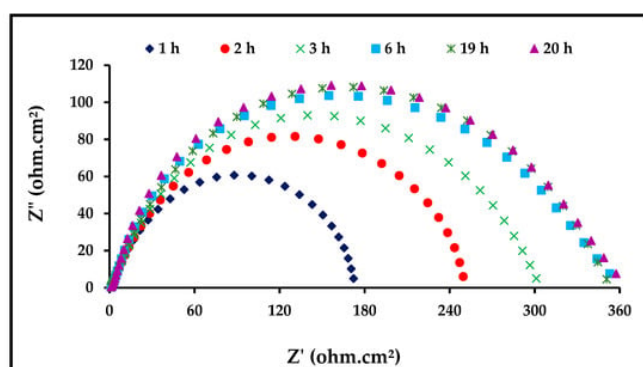


Рисунок 1.8 – Графики Найквиста для углеродистой стали в 1М растворе HCl с ZnO-NPs (6 мг/мл) при 298 К

Таблица 1.4 – Параметры коррозионных испытаний образцов углеродистой стали, полученные методом EIS

Time (h)	$R_{ct}$ (ohms.cm <sup>2</sup> )	$C_{dl}$ (mF)
1	200.0	0.53
2	276.4	0.49
3	302.0	0.32
6	343.4	0.30
19	353.0	0.29
20	359.3	0.28

Поверхность образцов углеродистой стали после погружения на 3 ч в 1М раствор HCl в отсутствие и присутствии ZnO-NPs с концентрацией 0,06 мг/мл изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа и энергодисперсионной спектроскопии, результаты которых представлены на рисунке 6. Видно, что углеродистая сталь после выдержки в 1М растворе HCl без ингибитора (рис.1.9а) подвергалась сильной коррозии, так как на поверхности появлялись трещины и ямки наряду с царапинами, в то время как в присутствии ингибитора (рис.1.9б) коррозию удалось предотвратить, и поверхность образцов осталась свободной от ямок и трещин, и присутствовало очень мало царапин [15].

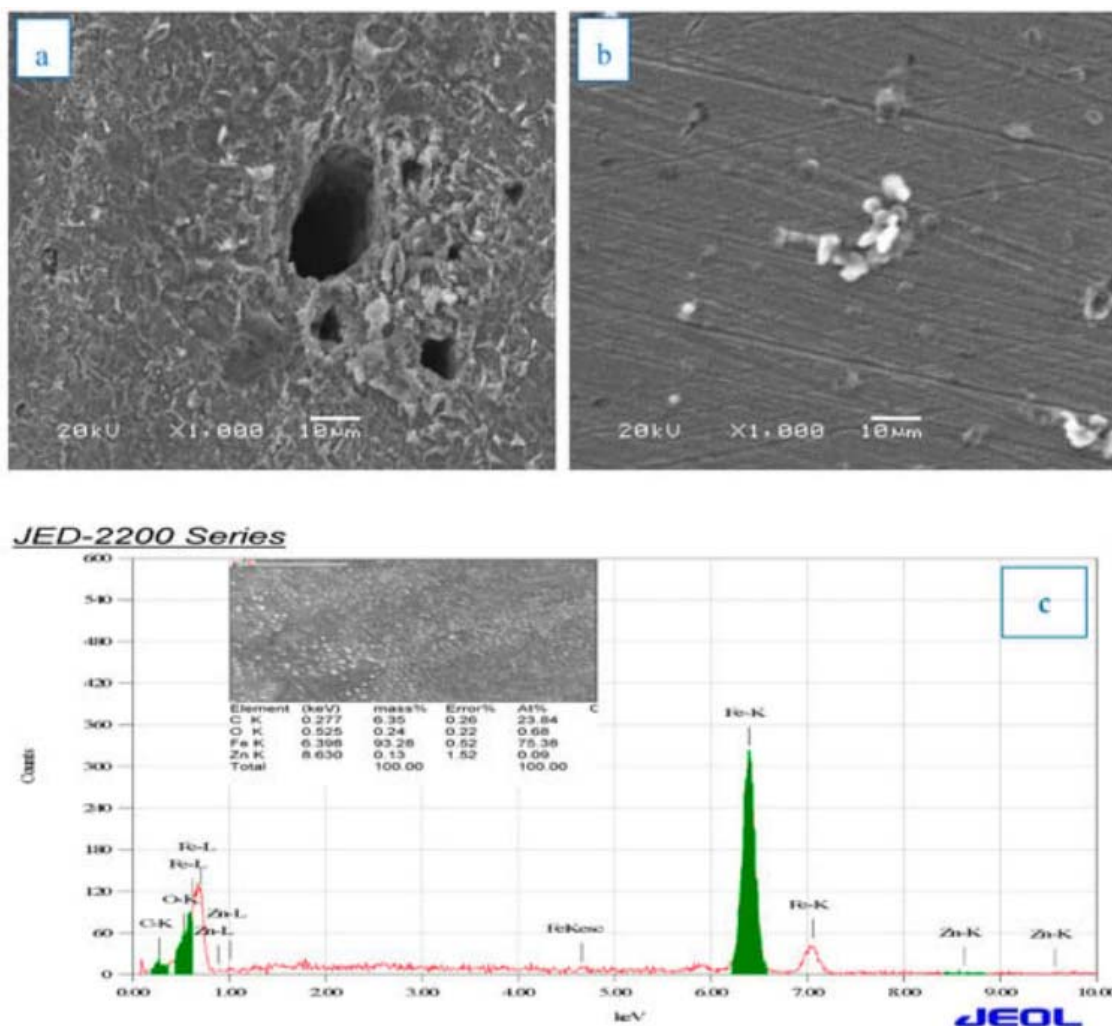
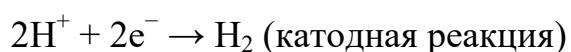
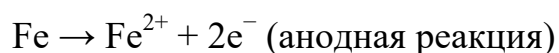


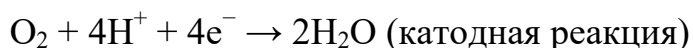
Рисунок 1.9 – СЭМ-изображения (а, б) и энергодисперсионной спектр (в) образцов углеродистой стали, после выдержки их в 1М растворе HCl в течение 3 ч при 298 К: а – без добавления наночастиц ZnO; б и в – в присутствии ZnO-NPs с концентрацией 0,06 мг/мл.

Кроме того, на поверхности углеродистой стали наблюдались частицы ZnO-NPs, что приводило к образованию защитной пленки на исследуемых образцах. Следовательно, ZnO-NPs являются эффективным ингибитором коррозии углеродистой стали, подвергнутой воздействию раствора HCl. На рисунке 1.9 в присутствии сигналов элементов O, Zn и C указывает на действие ингибитора на поверхность углеродистой стали, а также доказывают связывание наночастиц ZnO и экстракта листьев вьюнка полевого с катодными и анодными активными центрами на поверхности образцов углеродистой стали [14]. Низкий сигнал для O, высокий сигнал Fe и несколько сигналов Zn, в дополнение к сигналу углерода, указывают на высокую эффективность ингибитора, который снижает скорость коррозии и обеспечивает защиту поверхности углеродистой стали от воздействия агрессивных сред.

Авторы работы [8] предлагают следующий механизм ингибирования процесса коррозии. Наночастицы ZnO-NPs и экстракт вьюнка полевого растворяются в HCl и транспортируются к поверхности углеродистой стали, где образуются катионы  $Fe^{2+}$  и ионы  $H^+$  в результате протекания следующих реакций:



Кроме того, растворенный в объеме HCl кислород восстанавливается с образованием молекул воды в результате протекания реакции:



Функциональные группы экстракта вьюнка полевого содержат атомы O, C и N, которые при взаимодействии с наночастицами ZnO и ионами  $Fe^{2+}$  на границе раздела углеродистая сталь/раствор HCl образуют комплексное соединение. Сформированное комплексное соединение занимает активные анодные участки на поверхности образцов углеродистой стали, что приводит к снижению скорости коррозии [14].

Как правило, механизм адсорбции молекул ингибитора на поверхности углеродистой стали заключается в следующем:

1. Молекулы ингибитора адсорбируются на поверхности углеродистой стали за счет электростатического взаимодействия между электронами, адсорбированными на поверхности углеродистой стали (физическая адсорбция).

2. Присутствие гетероатомов, имеющих свободную электронную пару, усиливает химическую адсорбцию.

3. Поверхность углеродистой стали становится более отрицательной из-за накопления на ней электронов.

Это способствует переносу электронов с d-орбиталей Fe на несвязывающие  $\pi$ -орбитали в молекулах ингибитора, тем самым усиливая адсорбцию ингибитора на поверхности углеродистой стали.

На основании проведенного анализа литературных источников, посвященных возможности применения наночастиц ZnO в качестве ингибитора коррозии углеродистых сталей было установлено следующее:

1. Для образцов низкоуглеродистой стали наиболее агрессивной средой является кислая среда по сравнению с щелочной средой.

2. Добавление наночастиц ZnO к защитному покрытию из эпоксидной смолы позволяет снижать скорость протекания коррозионных процессов и предотвращать формирование продуктов коррозии на поверхности исследуемых образцов. Кроме того, различное содержание наночастиц ZnO в защитном покрытии демонстрирует разное влияние на характер протекания коррозионных процессов на поверхности стальных образцов при воздействии агрессивных сред разной природы.

3. Результаты, полученные с помощью методов потери веса, потенциодинамической поляризации и измерений EIS, продемонстрировали, что ZnO-NPs в дополнение к присутствию атомов N, O, C и S в функциональных группах экстракта листьев вьюнка полевого, являются эффективным ингибитором коррозии углеродистой стали в 1M растворе

HCl. Эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ZnO-NPs и снижается при более высоких температурах. Было обнаружено, что эффективность ингибирования составила более 91% при температуре 298 К и 89% при температуре 333 К.

4. Длительное время погружения увеличивает величину адсорбции молекул ZnO-NPs на поверхности углеродистой стали, и покрытие поверхности становится стабильным примерно через 6 часов выдержки, когда значение  $R_{ct}$  возрастает с 200 до 359,3 Ом·см<sup>2</sup>.

5. Результаты исследований методами СЭМ и ЭДС показали, что ZnO-NPs могут действовать как эффективный ингибитор коррозии углеродистой стали в 1М растворе HCl, где образование комплекса Fe<sup>2+</sup>+ZnO-экстракта листьев вьюнка полевого на границе раздела углеродистая сталь/ раствор HCl способствует снижению скорости коррозии.

## 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Объекты исследования

В данной работе для проведения коррозионных испытаний использовали образцы конструкционной стали Ст3, элементный состав которой представлен в таблице 2.1 [16]. Поверхность стальных образцов Ст3 перед проведением коррозионных испытаний шлифовали на наждачной бумаге (P320), а затем промывали в растворе этилового спирта. В качестве объектов исследования использовали образцы конструкционной стали Ст3 до и после нанесения ингибитора. В качестве ингибитора использовали нанопорошки ZnO (C = 0.15 % масс.), полученные с помощью распылительной сушки, которые с помощью ультразвуковой обработки в течение 15 минут были равномерно распределены в коммерческой водной дисперсии акрилового лака (ЗАО «Декарт»). Промежуточным вариантом для проведения коррозионных испытаний выступали образцы стали Ст3, на поверхность которых была нанесена водная дисперсия акрилового лака без добавления наночастиц ZnO. Ингибитор наносили на поверхность стальных образцов тонким слоем при помощи чистой хлопковой ткани или ватной палочки. После нанесения ингибитора две группы обработанных образцов подвергались выдержке в муфельной печи при температуре 40 °С в течение 20 минут. Коррозионные испытания исследуемых образцов проводили в водном растворе смеси концентрированных азотной и соляной кислот  $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=2:3:5$  путем выдержки их в течение. Образцы в количестве 3 штук были закреплены на держателе из фторопласта, который погружался в смесь кислот и выдерживался в течение 25 минут. Затем образцы извлекали из смеси кислот, остатки которых нейтрализовали с помощью дистиллированной воды, а удаление влаги с поверхности с помощью бумажных салфеток.

Таблица 2.1 – Элементный состав образцов стали Ст3 (масс. %)

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
~97	0,14- 0,22	0,15- 0,30	0,40- 0,65	<0,3	<0,05	<0,04	<0,3	< 0.008	<0,3

## 2.2 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ является основным методом исследования, который используется для определения фазового состава продуктов коррозии, имеющих кристаллическую структуру. Это обусловлено тем, что с помощью рентгенофазового анализа может быть проведен как качественный, так и количественный анализ фазового состава продуктов коррозии вне зависимости от вида коррозионного процесса, механизма коррозии, природы коррозионной среды и характера разрушения исследуемого образца. Соединения железа, которые образуются в процессе коррозионных испытаний, позволяют судить об условиях, в которых протекает процесс коррозии. На основании этого могут быть выявлены механизмы коррозионного разрушения исследуемых образцов и параметры среды, что позволит определить наиболее эффективные способы защиты их поверхности от коррозии.

Анализ фазового состава исследуемых образцов проводился методом рентгенофазового анализа (РФА) на основе анализа экспериментальных дифрактограмм, полученных на дифрактометре Shimadzu-7000. Дифрактограммы исследуемых образцов регистрировались методом непрерывного  $2\theta$ -сканирования с фокусировкой по Брэггу-Брентано при излучении медного анода (длина волны излучения  $\text{CuK}\alpha \lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ). Съемка велась с полированной поверхности с шагом  $0.05^\circ$ , время экспозиции составляло 10 секунд. Первичная обработка и теоретический расчет экспериментальных дифрактограмм исследуемых образцов был выполнен с помощью программных пакетов Renex и Powder Cell. Для описания профиля линий использовали функцию Лоренца [ 17 , 18 ]. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) картотеки ICDD.



## 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,

### РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Тема проекта «Исследование структурно-фазового состояния продуктов коррозии, формируемых на поверхности стальных материалов».

Одной из актуальных проблем промышленности и современного материаловедения является создание защиты стальных изделий от коррозии. Одним из наиболее эффективных, экономичных и экологически чистых методов защиты от коррозии является использование многофункциональных органических ингибиторов с добавлением наночастиц металлов и их оксидов. Добавление наночастиц повышает эффективность использования ингибиторов. Однако результаты исследования фазового состава продуктов коррозии стали и влияния ингибиторов коррозии на ее микроструктуру и фазовый состав в литературе практически отсутствуют. Целью данной работы являлось исследование морфологии поверхности, фазового состава и количественного соотношения продуктов коррозии, формируемых на поверхности стали Ст3 до и после нанесения на их поверхность ингибитора в виде акрилового лака с добавлением наночастиц ZnO в кислой среде.

Основная цель данного раздела – оценить перспективы разработки ингибиторов коррозии на основе нанопорошков ZnO, задействованных в данной работе, и спланировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

В этом разделе приведены рекомендации по выполнению следующих задач:

- С точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценить бизнес-потенциал и перспективы научных исследований
- Планирование научно-исследовательских работ
- Бюджет научно-технического исследования
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

#### **4.1. С точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценить бизнес-потенциал и перспективы научных исследований**

##### **4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

В последнее десятилетие контроль скорости коррозии металла наноматериалами – это способ подчеркнуть новое открытие в области нанотехнологий. Наноматериалы обладают более высокой адгезионной способностью и являются хорошими добавками для ингибиторов коррозии благодаря большой пропорции поверхности к объему по сравнению с их обычными макроскопическими материалами.

В данной ВКР предлагается использовать частицы ZnO в качестве ингибитора коррозии. Воздействие металлов на растворы наночастиц позволяет расположить их в основном в трещинах, сглаживая дефектные поверхности и, таким образом, повышая коррозионную стойкость. Полученные продукты представляют практический интерес для решения проблем защиты стали от коррозии. Предлагаемое в исследовании решение актуально как для производителей деталей из низколегированной стали, компаний транспортировки металлоизделий, так и для предприятий, эксплуатирующих металлическое оборудование и нефтеперерабатывающих компаний.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В процесс исследования рассматривались две конкурирующие разработки:

1. Исследование гидрофобного нано-TiO<sub>2</sub> покрытия и его свойств для коррозионной защиты металлов (к1); 2. Исследование антикоррозионной способности наносмешанного оксида металла пигментное дисперсное алкидное покрытие и его оптимизация для стали А36 (к2).

В таблице 4.1 представлено сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1. – Сравнение конкурентных технических решений  
(разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Устойчив к агломерации	0,14	5	3	3	0,7	0,42	0,42
2. Размер частицы	0,13	5	2	4	0,65	0,26	0,52
3. Выдерживание высоких температур	0,08	4	5	1	0,32	0,4	0,08
4. Коррозионная стойкость	0,08	5	3	2	0,4	0,24	0,16
5. Технологичность	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
6. Эффективность работы	0,16	5	2	2	0,8	0,32	0,32
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Реализация продукта на рынок	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Уровень охвата рынка					0,12	0,09	0,15

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
	0,03	4	3	5			
3.Предполагаемая цена	0,08	5	3	5	0,4	0,24	0,4
4.Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	4	3	0,4	0,32	0,24
5.Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,03	5	5	4	0,15	0,15	0,12
6.Срок выхода на рынок	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
7.Наличие сертификации разработки	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>82</b>	<b>64</b>	<b>64</b>	<b>4.89</b>	<b>3.36</b>	<b>3.33</b>

Примечание: Б<sub>ф</sub>-баллы исследуемого НИР; Б<sub>к1</sub>-баллы конкурента 1; Б<sub>к2</sub>-баллы конкурента 2; К<sub>ф</sub>-конкурентоспособность исследуемого НИР; К<sub>к1</sub>-конкурентоспособность конкурента 1; К<sub>к2</sub>-конкурентоспособность конкурента 2.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1-наиболее слабая позиция, а 5-наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где K – конкурентоспособность проекта; V<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы); B<sub>i</sub> – балл i-го показателя.

Из анализа существующих конкурентных технических решений (табл. 4.1) следует, что предлагаемая технология использования золь наночастиц ZnO в качестве ингибиторов коррозии основана на новых способах изготовления высокоэффективных антикоррозионных суспензии вводя наночастицы в состав традиционных ингибиторов. Кроме того, можно отметить, что у конкурентов

комплексный подход к проблеме коррозии практически не описан. Основная часть исследования описывает либо методы очистки поверхности, либо методы ингибирования металлов. Важно отметить, что такие критерии, как эффективность ингибитора, устойчивость к агломерации и размер частиц, выше, чем у конкурентов, поэтому использование наночастиц ZnO в составе органических ингибиторов более перспективно.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что предлагаемое в данной ВКР решение обладает высокой степенью конкурентоспособности.

### 4.1.3 Технология QuaD

Технология QuaD (Quality consultant) - это инструмент управления качеством, который помогает компаниям повышать качество своих продуктов и услуг. Хотя в настоящее время не существует четкого инструмента QuaD, мы можем строить предположения о функциях и показателях QuaD, основываясь на основных принципах управления качеством. Ниже кратко описаны функции и индикаторы QuaD :

функция :

1. Мониторинг качества: QuaD может контролировать качество продуктов и услуг, чтобы убедиться, что они соответствуют установленным стандартам качества.

2. Сбор данных: QuaD может собирать данные, связанные с качеством, такие как дефекты в производственном процессе, отзывы клиентов, характеристики продукта и т.д.

3. Анализ данных: QuaD может анализировать собранные данные о качестве, чтобы выявить причины и тенденции проблем с качеством.

4. Процесс оптимизации: QuaD может вносить предложения по улучшению, чтобы помочь компаниям оптимизировать производственные и сервисные процессы и повысить качество.

5. Непрерывное улучшение: QuaD может непрерывно контролировать качество и корректировать меры по улучшению на основе результатов анализа для достижения непрерывного улучшения качества.

6. Отчеты о качестве: QuaD может создавать отчеты о качестве, чтобы помочь компаниям понять состояние качества продукции и услуг, чтобы принимать решения и совершенствоваться.

указатель :

1. Коэффициент прохождения: измеряет долю продуктов или услуг, которые соответствуют заранее установленным стандартам качества.

2. Процент брака продукции: Измеряет долю дефектов в продукте.

3. Удовлетворенность клиентов: Измерьте степень удовлетворенности клиентов качеством продукта или услуги.

4. Количество жалоб: Измеряет долю клиентов, которые подают жалобы из-за проблем с качеством продукции или услуг.

5. Коэффициент возврата товара: Измеряет долю возвратов товара из-за проблем с качеством в общем объеме продаж.

6. Затраты на качество: Измерьте затраты, вложенные предприятием в обеспечение качества, включая затраты на предотвращение, идентификацию, стоимость внутренних отказов и стоимость внешних отказов.

7. Стабильность процесса: Измерьте степень колебаний качества в производственном процессе.

Благодаря вышеуказанным функциям и показателям QuaD (Quality consultant) может помочь компаниям лучше контролировать качество продуктов и услуг и управлять им, тем самым повышая удовлетворенность клиентов и конкурентоспособность на рынке.

#### **4.1.4 SWOT-анализ**

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами проекта. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление

возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Матрица SWOT представлена в таблице 4.2.

**Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа**

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1.Простое в сборке и обращении оборудование.	Сл1.Дороговизна оборудования
С2.Квалифицированная проектная команда	Сл2. Получение продукта в малых количествах
С3. Доступность сырья.	Сл3. Необходимость поддерживать качество готового продукта
С4.Наличие бюджетного финансирования	Сл4. Высокие требования к точности изготовления продукта.
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ	У1. Отсутствие спроса на технологии производства
В2. Появление дополнительного спроса на технологию.	У2. Ограничения на экспорт технологии
В3. Получение чистого продукта.	У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции
В4. Спрос на экологически безопасную продукцию	У4. Возможный рост стоимости сырья

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта,

а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>					
<b>Возможности проекта</b>		<b>С1</b>	<b>С2</b>	<b>С3</b>	<b>С4</b>
	<b>В1</b>	+	+	-	+
	<b>В2</b>	+	-	+	-
	<b>В3</b>	-	+	+	-
	<b>В4</b>	+	+	+	+

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

<b>Слабые стороны проекта</b>					
<b>Возможности проекта</b>		<b>Сл1</b>	<b>Сл2</b>	<b>Сл3</b>	<b>Сл4</b>
	<b>В1</b>	-	-	+	+
	<b>В2</b>	+	+	-	+
	<b>В3</b>	-	-	-	-
	<b>В4</b>	-	-	-	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>					
<b>Угрозы проекта</b>		<b>С1</b>	<b>С2</b>	<b>С3</b>	<b>С4</b>
	<b>У1</b>	+	+	+	+
	<b>У2</b>	-	+	-	-
	<b>У3</b>	-	-	-	-
	<b>У4</b>	-	-	-	-



Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

<b>Слабые стороны проекта</b>					
<b>Угрозы проекта</b>		<b>Сл1</b>	<b>Сл2</b>	<b>Сл3</b>	<b>Сл4</b>
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	+	+
	У3	-	-	-	-
	У4	-	-	-	-

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7. –SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно исследовательского проекта</b></p> <p>С1. Простое в сборке и обращении оборудование.</p> <p>С2. Квалифицированная проектная команда</p> <p>С3. Доступность сырья.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно исследовательского проекта</b></p> <p>Сл1. Дороговизна оборудования</p> <p>Сл2. Получение продукта в малых количествах</p> <p>Сл3. Необходимость поддерживать качество готового продукта</p> <p>Сл4. Высокие требования к точности изготовления продукта.</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на технологию.</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>В1С1С2С3. Оборудование ИШНПТ ТПУ позволяют изготавливать изделия по данной технологии.</p> <p>В2С1С3. Высокая</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>В1Сл3Сл4. Никакие возможности оборудования не уберегут на 100% продукцию от</p>

<p>В3. Получение чистого продукта.</p> <p>В4.Спрос-на-экологически безопасную продукцию.</p>	<p>эффективность продукции с экологичностью позволяют расширить спрос, использование новейшей информации и технологий соответствует потенциальному спросу на новые разработки.</p> <p>В3С2С3. Высокая антикоррозионные свойства продукции являются хорошим основанием для внедрения технологии в промышленные области.</p> <p>В4С2С3С4. Простота изготовления, использование малого объёма сырья, высокая коррозионная стойкость продукции являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.</p>	<p>погрешностей и неточностей.</p> <p>В2Сл1Сл2Сл4.</p> <p>Появлению спроса может помешать наличие традиционных предложений на рынке ингибиторов.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на технологии производства</p> <p>У2. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к</p>	<p><b>Угрозы развития</b></p> <p>У1С1С2С3С4. Несмотря на снижение стоимости разработок конкурентов, наши продукты имеют лучшие механические свойства, больше перспектив развития.</p> <p>У1С2. Наши продукты</p>	<p><b>Уязвимости:</b></p> <p>У2Сл1Сл2</p> <p>Недостаточность литературных данных, долгая реализация цикла производства вместе с исследованиями могут дать выиграть время конкурентам.</p>

стандартизации и сертификации продукции	обладают лучшими механическими свойствами, являются более привлекательными	
У4. Возможный рост стоимости сырья	мировом рынке	

В результате SWOT-анализа показано, что у проекта гораздо больше сильных сторон. Но все же существуют некоторые угрозы для внедрения проекта, такие как дороговизна оборудования и получения продукта в малых количествах, однако, развитие технологий со временем нивелирует данные трудности.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Важным этапом данного проекта является составления графика проведения научного исследования, который предназначен для распределения обязанностей по выполнению работ и определения временных рамок производимой работы. Данный раздел содержит этапов в рамках проведения научного исследования, а также в данном разделе проведено распределение исполнителей по видам работ.

Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8. – Список производимых задач и работ и их исполнители

№ раб	Наименование	Продолжительность, дней	Исполнители
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1,8	Научный руководитель
2	Разработка и утверждение программы диссертации	4,6	Инженер, научный руководитель

3	Обзор научной литературы	8,2	Инженер
4	Выбор методов исследования	1,8	Инженер
5	Планирование эксперимента	2,8	Инженер, научный руководитель
6	Получение наночастиц ZnO и подготовка образцов для коррозионных испытаний	7,8	Инженер
7	Испытания на коррозию стали в определенных кислых условиях	8,8	Инженер
8	Проведение рентгенофазового анализа продуктов коррозии стали	5,8	Инженер
9	Обработка полученных данных	8,2	Инженер
10	Оценка правильности полученных результатов	6,8	Инженер, научный руководитель
11	Написание ВКР, подготовка к защите	8,2	Инженер

#### **4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения**

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

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

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

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

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

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

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

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

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

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

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.кж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

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

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

$k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

(4.4)

где  $T_{кал}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – общее количество праздничных дней в году (2020 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9. – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожг}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1	-	3	-	1,8	-	1,8	3
2.Разработка и утверждение программы диссертации	3	3	7	6	4,6	4,2	4,6	7
3.Обзор научной литературы	-	7	-	10	-	8,2	8,2	12
4.Выбор методов исследования	-	1	-	3	-	1,8	1,8	3

5.Планирование эксперимента	2	2	4	4	2,8	2,8	2,8	4
6.Получение наночастиц ZnO и подготовка образцов для коррозионных испытаний	-	7	-	9	-	7,8	7,8	11
7.Испытания на коррозию стали в определенных кислых условиях	-	8	-	10	-	8,8	8,8	13
8.Проведение рентгенофазового анализа продуктов коррозии стали	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
9.Обработка полученных данных	-	7	-	10	-	8,2	8,2	12
10.Оценка правильности полученных результатов	2	6	4	8	3,4	3,4	6,8	10
11.Написание ВКР, подготовка к защите	-	7	-	10	-	8,2	8,2	12
<b>Итого</b>	<b>8</b>	<b>53</b>	<b>18</b>	<b>76</b>	<b>12,6</b>	<b>62,6</b>	<b>64,8</b>	<b>96</b>

*Примечание:* Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	$T_{ki}$ кал. дн.	Продолжительность работ														
				февр			март			апр			май					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп2	3	1														
2	Разработка и утверждение программы диссертации	Исп1 Исп2	7	1	2													
3	Обзор научной литературы	Исп1	12		1	2												
4	Выбор методов исследования	Исп1	3		1	2												
5	Планирование эксперимента	Исп1 Исп2	4			1	2											
6	Получение наночастиц ZnO и подготовка образцов для коррозионных испытаний	Исп1	11				1	2	3									
7	Испытания на коррозию стали в определенных кислых условиях	Исп1	13					1	2	3								
8	Проведение рентгенофазового анализа продуктов коррозии стали	Исп1	9						1	2	3							





### 4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции (таблица 4.10).

Таблица 4.10. – Стоимость экспериментальных материалов

Наименование	Итого затраты, руб.
Акриловый лак	216
Наноксид цинка порошок	300
Соляная кислота	224
Нитраты азота	210
Ст3 Сталь	598
Итого	1548

### 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{N_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 4.11 - Затраты на оборудование

Материалы и оборудование	Колво, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
Аналитические весы	1	5	40	40
Микроскоп класса	1	5	136	136
Мультиметр и электрод	1	5	50	50
<b>Итого</b>	226 000. руб.			

$$A = \frac{N_A I}{12} \cdot m = \frac{0.2 \cdot 226000}{12} \cdot 3 = 11300 \text{ руб}$$

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает в себя основную заработную плату  $Z_{\text{осн}}$  и дополнительную заработную плату  $Z_{\text{доп}}$ :

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

Дополнительная заработная плата составляет 12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ .

Основная заработная плата работника:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

Где:  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых исполнителем проекта, раб. дн.;

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

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d},$$

Где:  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 28 раб. дней  $M=11$  месяцев, 5-дневная неделя;

при отпуске в 56 раб. дней  $M=10$  месяцев, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей проекта,  
раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

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

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

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, принимаем 0,2;

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

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

Где:  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,135).

Расчет заработной платы руководителя (пятидневная рабочая неделя):

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 11}{365 - 117 - 28} = 2564,25 \text{руб.};$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 2564,25 \cdot 12,6 = 32309,55 \text{руб.};$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,135 \cdot 32309,55 = 4361,79 \text{руб.}$$

Расчет заработной платы инженер (пятидневная рабочая неделя):

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11}{365 - 117 - 28} = 1657,5 \text{руб.};$$

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p = 1657,5 \cdot 62,6 = 103759,5 \text{руб};$$

$$Z_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,135 \cdot 103759,5 = 14007,53 \text{руб}.$$

Таблица 4.12. – Расчет заработной платы работников

Исполнитель проекта	$Z_{\text{ТС}}$ руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ руб.	$Z_{\text{дн}}$ руб.	$T_{\text{р,раб}}$ дн.	$Z_{\text{осн}}$ руб.	$k_{\text{д}}$	$Z_{\text{доп}}$ руб.	Итого, руб.
руководитель	26300				51285	2564,25	12,6	32309,5		4361,79	18369,3
инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1657,5	62,6	103759,5	0,135	14007,53	2

#### 4.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \times (32309,55 + 4361,79) = 11001,4 \text{руб}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \times (103759,5 + 14007,53) = 35330,11 \text{руб}$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30%.

#### 4.3.5. Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5

статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.13 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
11300	1548	136068, 8	18369, 29	46331,43	213 617,52

#### 4.3.6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета на проект приведено в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Бюджет затрат на проектирование закалочной установки

Наименование	Сумма, руб.	В % к итогу
1. Материальные затраты проекта	1548	0.74%
2. Амортизация	11300	
3. Затраты по основной зарплате	136068, 8	65.90%
4. Затраты по дополнительной зарплате	18369, 29	9.88%
5. Отчисления во внебюджетные фонды	46331,43	22.88%
6. Накладные расходы	42723,5	0.60%
<b>Бюджет затрат на проектирование</b>	<b>256 341</b>	<b>100</b>

Бюджет всех затрат проекта равен **256 341 рублей**.

Наибольший процент бюджета составляют затраты по основной зарплате (65.90%).

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет работы влияния наночастиц ZnO на коррозионное поведение стали Ст3 по форме, приведенной в таблице 4.15. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно исследовательских проектов.

Таблица 4.15 – Расчет бюджета затрат НИИ

№	Наименование статьи	Примечание		
		Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИИ	1608	1623	Пункт 4.3.1
2	Амортизация	11300	11300	11300
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	144735.84	136374.04	Пункт 4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	24052.41	20425	Пункт 4.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	48859.11	47382.65	Пункт 4.3.4
6	Накладные расходы	1739	2151	Пункт 4.3.5
Бюджет затрат НИИ		232 294,36	219255,69	Сумма ст. 1- 6

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

Определение эффективности основано на расчете общего показателя эффективности научных исследований. Он находится путем определения

двух средневзвешенных показателей: финансовой эффективности и эффективности использования ресурсов.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения [1].

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

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

$\Phi_{pi}$  – технология, разработанная в результате выполнения научно-исследовательской работы;

$\Phi_{\text{max}}$  – конкурентная разработка отработки технологии аддитивного производства методом подбора технологических параметров. Стоимость разработки такой технологии повышается из-за необходимости проведения экспериментальных исследований, включающих отработку технологических параметров на промышленном оборудовании аддитивного производства.

Определение ресурсоэффективности происходит на основе интегрального показателя ресурсоэффективности

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

Где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.



Таблица 4.16. – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Устойчивость агломерации	0,14	5	3	3
2. Размер частицы	0,13	5	2	4
3. Коррозионная стойкость	0,08	5	3	2
4. Эффективность работы	0,16	5	2	2
5. Реализация продукта	0,1	5	5	5
ИТОГО	1	3,05	1,74	1,92

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_p = 0,14 \cdot 5 + 0,13 \cdot 5 + 0,08 \cdot 5 + 0,16 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 3,05$$

$$I_{p1} = 0,14 \cdot 3 + 0,13 \cdot 2 + 0,08 \cdot 3 + 0,16 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 = 1,74$$

$$I_{p2} = 0,14 \cdot 3 + 0,13 \cdot 4 + 0,08 \cdot 2 + 0,16 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 = 1,92$$

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

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}} \quad (20)$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4,17).

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,935	0,941
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,05	1,74	1,92
3	Интегральный показатель эффективности	3,26	1,74	2,04
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,53	0,63

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является текущий проект. Текущий проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

#### 4.5 Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 96 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 86 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 15 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет **256 341** руб.;

4. Результат оценки эффективности НИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя НИР составляет что 1, является показателем того, что НИР является финансово не совсем выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности НИР составляет 3,05, по сравнению с 1,74 и 1,92;

3) значение интегрального показателя эффективности НИР составляет 3,26, по сравнению с 1,74 и 2,04, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в НИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.