

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

Институт Энергетический
Направление подготовки «Энергетическое машиностроение»
Кафедра «Парогенераторостроение и парогенераторные установки»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Исследование сопротивления упругопластическому деформированию металла стенки трубы пароперегревателя после термоциклического старения»

УДК 621.184.3:539.3-043.92

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Новгородцев Александр Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ПГС и ПГУ	Ташлыков Александр Анатольевич	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Попова Светлана Николаевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	д.т.н., профессор		

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
Р1	Способность и готовность самостоятельно учиться и развивать свой общекультурный и интеллектуальный уровень, изменять свой научный и научно-производственный профиль в течение всего периода профессиональной деятельности с учетом изменения социокультурных и социальных условий, вести педагогическую работу в области профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 2.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Способность проявлять и использовать на практике навыки и умения организации работ по решению инновационных инженерных задач в качестве члена или руководителя группы, нести ответственность, в том числе в ситуациях риска, за работу коллектива с применением правовых и этических норм при оценке и самооценке профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов, проблемных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-2; ОПК-1; ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.3., п. 2.4., п. 2.5.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Способность и готовность приобретать и применять новые знания и умения с использованием методологических основ научного познания и библиографической работы с привлечением современных технологий, понимать роль информации в развитии науки, анализировать её естественнонаучную сущность, синтезировать и творчески применять при решении инновационных профессиональных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Способность осуществлять коммуникации в профессиональной сфере и в обществе в целом, принимать нестандартные решения с использованием новых идей, разрабатывать, оформлять, представлять и докладывать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке	Требования ФГОС ВО (ОК-2,3;ОПК-2,3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Профессиональные компетенции		
P6	Способность и готовность выполнять инженерные проекты с использованием современных технологий проектирования для разработки конкурентно способных энергетических установок с использованием знаний теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах и аппаратах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (п. 1.3.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и вырабатывать компромиссные решения с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний в условиях неопределенности, использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4,

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	эксперименты, формулировать выводы в условиях неоднозначности с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию	п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р9	Способность и готовность оценивать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, с применением современного оборудования и приборов, анализировать и разрабатывать рекомендации по их надежной и безопасной эксплуатации, понимать проблемы научно-технического развития сырьевой базы, современных технологий по утилизации отходов в энергетическом машиностроении и теплоэнергетике и научно-техническую политику в этой области	Требования ФГОС ВО (ОПК-1; ПК-7,8,9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, п. 2.1.), 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 Энергетический
 Направление подготовки 13.04.03 Энергетическое машиностроение
 Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой
 _____ Заворин А.С.
 (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
5ВМ4Б	Новгородцеву Александру Александровичу

Тема работы:

Исследования сопротивления упругопластическому деформированию металла стенки трубы пароперегревателя после термического старения.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.16, № 715/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Объект исследования: труба пароперегревателя парового котла. 2. Материал исследования: энергетическая трубная жаропрочная низколегированная перлитная сталь марки 12Х1МФ. 3. Труба после последовательного естественного старения и термоциклирования. 4. Исследование процесса пластического холодного циклического деформирования.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Введение (Обоснование необходимости исследований трубной энергетической стали. Актуальность исследований, методика и средства исследований. Постановка цели и задач исследования). 2. Обзор литературы по проблеме диагностики и оценки остаточного ресурса особо опасных производственных объектов. 3. Обоснование методики и методов исследования. 4. Экспериментальные результаты исследования. Обсуждения, выводы и заключения. 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 6. Социальная ответственность. 7. Заключение, в т.ч. на иностранном языке.
Перечень графического материала (формата А1)	Графическая часть представляется в форме презентации

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.03.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ПГС и ПГУ	Ташлыков Александр Анатольевич	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Новгородцев Александр Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Новгородцеву Александру Александровичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Дрон 3.0 – 2280000 руб. Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб., Потенциометр – 5400 руб., Милливольтметр – 2700 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	–
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Дополнительная зарплата – 10%; Районный коэффициент – 30%; Отчисления на социальные нужды – 27%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	–
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	–
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	–
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	–

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Таблица 1 – Состав и структура длительности НИР
2. Таблица 2 – Планирование НИР
3. Таблица 3 – Основная заработная плата участников НИР
4. Таблица 4 – Линейный график НИР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Попова Светлана Николаевна	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Новгородцев Александр Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Новгородцеву Александру Александровичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Рассматриваемая рабочая зона представляет собой аудиторию № 223 четвёртого корпуса НИ ТПУ, в которой студентом проводилась работа по исследованию сопротивления пластическому деформированию материалов для энергомашиностроения для магистерской диссертации. В частности, выполнялись рентгеносъёмка, измерение данных и обработка их на компьютере. В помещении существует опасность поражения рентгеновским излучением, электрическим токами возникновения возгорания. Помимо этого, на находящиеся в таком помещении люди могут оказывать влияние вредные факторы, такие как некачественное освещение, шум, электромагнитное излучение, запылённость и ненадлежащее состояние микроклимата.</i></p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты) 	<p><i>Основными вредными факторами при работе в рассматриваемой рабочей зоне являются факторы, связанные с качеством освещения, уровнем шума, состоянием микроклимата, запылённостью и интенсивностью излучения. Необходимо определить нормативные значения данных факторов для данного помещения. Предложить мероприятия по уменьшению воздействия вредных факторов и привести возможные средства защиты.</i></p> <p><i>Основными опасными факторами для данного помещения являются возможность поражения рентгеновским излучением, электрическим током и возникновение пожара. Источниками возникновения данных факторов являются работающее рентгеновское (ДРОН 3) и другое электрооборудование и неправильное обращение с ним. Необходимо рассмотреть средства и мероприятия по организации безопасной работы с ним, а также средства защиты (например, месторасположение и порядок использования средств пожаротушения).</i></p>

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p><i>Рассматриваемая рабочая зона не оказывает существенного воздействия на атмосферу, гидросферу и литосферу. Срок эксплуатации комплектующих данного оборудования достаточно велик. По истечении срока службы часть оборудования передается на восстановление, а часть поступает в отходы.</i></p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p><i>Наиболее возможными ЧС в рассматриваемой рабочей зоне является возникновение пожара. Рассмотреть средства, определяющие действия при возникновении ЧС и ликвидации их последствий (например, план эвакуации и средства пожаротушения).</i></p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>Определить порядок и организацию работы в рассматриваемом помещении, обеспечивающие безопасные и комфортные условия труда, с соблюдением санитарных и технологических норм</i></p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Новгородцев Александр Александрович		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из: 88 страниц, 26 рисунков, 17 таблиц, 42 источников, одного приложения.

Ключевые слова: сталь, пароперегреватель, термоциклирование, упругопластическое деформирование, внутренние структурные напряжения I и II рода, сопротивление упругопластическому деформированию, диагностика.

Исследовано сопротивление упругопластическому деформированию металла стенки трубы из стали 12Х1МФ после термоциклического старения.

Экспериментальные исследования выполнены с применением рентгеноструктурного анализа на рентгеновском аппарате ДРОН-3.0 и рентгеноспектрального анализа на аппарате EDX-2800.

Методика исследований, широко применяемая в экспериментальной практике и имитирующая условия эксплуатации от внутренних давлений при внешних знакопеременных изгибающих и растягивающих нагрузках, сводилась к гидравлическому прессованию.

В результате исследований были сформулированы рекомендации по диагностике стали 12Х1МФ.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;
- МКК – межкристаллитная коррозия;
- ТЭС – тепловая электрическая станция;
- РСА – рентгеноструктурный анализ;
- РФА – рентгенофазовый анализ;
- МЗГ – межзеренная граница;
- E – модуль нормальной упругости, МПа;
- G – модуль упругости при сдвиге, МПа;
- μ – коэффициент Пуассона;
- d – межплоскостное расстояние, Å;
- a – параметр элементарной ячейки, Å;
- λ – длина волны рентгеновского излучения, Å;
- b – межатомное расстояние, Å;
- θ – угол дифракции, градусов;
- $\theta_{ц.т}$ – центр тяжести дифракционного максимума, градусов;
- ρ – плотность дислокаций, $1/\text{см}^2$;
- $B_{0.5}$ – полуширина дифракционной линии, градусов;
- $b_{0.5}$ – инструментальная полуширина, градусов;
- β – общее физическое уширение дифракционной линии, радиан;
- m – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная дисперсностью, радиан;
- n – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная микронапряжениями, радиан;
- σ_I – макронапряжения I рода, МПа;
- σ_{II} – микронапряжения II рода, МПа;
- $\sigma_{в}$ – временное сопротивление, МПа;
- $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести, МПа;
- D – средний размер кристаллита, Å.

СОДЕРЖАНИЕ

	С
ВВЕДЕНИЕ	13
1 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАЛИ 12Х1МФ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	15
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ	18
3 УСТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦА СТАЛИ 12Х1МФ	26
4 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ХОЛОДНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ.....	30
5 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	53
6 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	59
7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	59
8 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	84
ПРИЛОЖЕНИЕ А Аннотация на английском языке	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Список публикаций	103

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности работы энергетического оборудования станций с каждым днем становится все более важной задачей, так как физический и моральный износ оборудования опережает темпы ввода новых мощностей. В настоящее время многие объекты энергетики исчерпали свой проектный ресурс [1]. Поэтому одной из основных проблем энергетики является поддержание оптимального баланса между вводимыми в эксплуатацию мощностями и реконструкцией и модернизацией старых действующих электростанций.

Повреждаемость энергетического оборудования в Российской Федерации вырос до критических уровней: средняя изношенность трубопроводов составляет 70–80 %. Помимо этого, на низком уровне находится производство энергетического оборудования – и с каждым годом заказчики все чаще при проектировании новых мощностей и замене физически и морально изношенных установок предпочитают иностранное оборудование.

Основной причиной, порождающей физическое разрушение многих машин, является механический износ их деталей. При этом на первой стадии повреждаемости наблюдается снижение эксплуатационных характеристик оборудования, что зачастую приводит к экономической нецелесообразности эксплуатации оборудования или к его аварийному состоянию.

Одним из методов устранения физического разрушения может являться ремонт или замена узла или детали. Это позволяет увеличить сроки службы действующего оборудования.

Все перечисленное становится чрезвычайно актуальными проблемами применительно к практике использования энергетических объектов, так как непосредственно они связаны с обеспечением ресурса, диагностикой текущего состояния, а так же прогнозом надежности эксплуатации деталей и узлов промышленных и отопительных котлов.

На данный момент имеется большое количество физических методов анализа и диагностики труб, некоторые из которых направлены на решение поставленных задач по продлению ресурса и предотвращению отказов трубных поверхностей нагрева и успешно их выполняют. Тем не менее, при всем современном множестве методов диагностики, наиболее надежной и признанной в настоящее время является оценка состояния металла трубных поверхностей нагрева по порам ползучести, а их остаточный ресурс определяется плотностью металла, который снижается при растущем порообразовании, а так же размером пор.

Использованный в данной работе метод диагностики состояния металла рентгеновским методом по величине и корректировке напряжений при механических испытаниях методом циклического деформирования позволяет максимально точно спрогнозировать развитие пор и трещин в трубах и, основываясь на эти прогнозы, давать рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

1 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАЛИ 12Х1МФ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Низколегированные стали, к которым относится 12Х1МФ, предназначены в первую очередь для паропроводных и пароперегревательных труб, которые работают при температурах, не превышающих 585 °С. Необходимый уровень жаропрочности в этих сталях достигается за счет комплексного легирования хромом, ванадием, молибденом, ниобием. Содержание каждого из легирующих элементов не превышает 1 %, чаще всего от 0,2 до 0,5 %, за исключением хрома, содержание которого доходит до 2 %.

Указанные элементы повышают силы связи атомов в решетке железа, вызывают дисперсионное твердение, способствуют формированию в процессе фазовых $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращений тонкой субструктуры и стабилизируют карбидную фазу. Все эти факторы и способствуют тому, что металл может длительное время работать при весьма высоких температурах в виде конструкции, которая находится в сложнапряженном состоянии.

Чем выше температура, тем сложнее состав стали по легирующим добавкам (химический состав приведен в таблице 1.1). Оптимальное содержание углерода в легированных сталях составляет от 0,08 до 0,12 % (по массе). Повышение содержания углерода сверх указанной величины приводит к ускорению коалесценции карбидов и обеднению твердого раствора главным образом молибденом. Уход молибдена из твердого раствора приводит к потере прочностных свойств сталей. При разработке сталей учитывали также и то, что все трубные стали должны быть хорошо свариваемыми и, следовательно, иметь ограниченное содержание углерода.

Таблица 1.1 – Химический состав стали 12Х1МФ по ГОСТ 20072-74

Химический элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V
Содержание, %	0,10-0,15	0,17-0,37	0,4-0,7	0,3	0,025	0,03	0,9-1,2	0,25-0,35	0,15-0,3

Большая наработка эксплуатируемого энергооборудования, разрушение труб, износ гибов, отсутствие как таковых четких критериев оценивания состояния металла и его изношенности вызвали в последнее время появление ряда работ, в которых разрабатываются разного рода критерии для оценивания износа материала. На основании физических представлений о повреждении стенки трубы при высоких температурах под напряжением был разработан совершенно новый подход к проблемам прогнозирования, суть которого базируется на связи ресурса металла со степенью повреждаемости микропорами. Было установлено, что первые стадии повреждения (микропоры) возникают на разных стадиях ползучести. Впрочем, до перехода в III этап ползучести изношенность невысокая, в микроструктуре присутствуют отдельные поры размером до 0,5 мкм. Во время перехода ползучести в III этап на границах зерен возникает присутствие пор размером от 1 до 3 мкм, по мере увеличения ползучести наблюдается возрастание количества одиночных микропор на границах зерен, образование цепочек микропор и объединение их в трещины. Повреждение возникает путем слияния микротрещин на границах зерен в магистральные трещины [4].

С этим учетом были выдвинуты методы оценивания изношенности, к числу которых относятся растровая электронная микроскопия, электронно-микроскопическое исследование металла на просвет, гидростатическое взвешивание, световая микроскопия [4].

Плотность дислокаций по границам зерен выше, чем в ферритной матрице. По границам зерен наблюдаются дислокационные сетки. Размытость границ доказывает то, что дислокации наделены некоторой подвижностью. Отсюда следует, что по электронно-микроскопическому исследованию можно правильно оценить процессы изношенности металла – как при деформационном, так и при бездеформационном повреждениях.

В ходе ползучести возрастает пористость металла и, как итог, и его плотность, поэтому оценивание изношенности стали можно осуществлять по изменению плотности.

При изучении металла, который работает на I и II этапах ползучести, микропор выявлено не было. Одиночные микропоры обнаруживались на металле в конце II этапа ползучести. Плотность микропор возрастала к концу III этапа ползучести.

На данный момент сформулированы основные критерии оценивания работы стали [4]:

- предел длительной прочности – повреждение возникает при сравнении приведенных напряжений, которые действуют в металле, с пределом длительной прочности;

- предел ползучести (предел длительной пластичности) – повреждение возникает при истощении допустимой для каждой марки стали остаточной деформации.

Разрушаемость стали из-за долгой эксплуатации идет в полной аналогии с классической кривой ползучести. Так как узлы и элементы энергетического оборудования эксплуатируются при различных температурах (до 565 °С) и неоднородных напряжениях (от 20 до 100 МПа), кривые ползучести имеют весьма неоднородный вид. Данное положение объясняется доминирующим фактором физических процессов, протекающих в материале при ползучести. Впрочем, во всех случаях износ элементов энергооборудования, действующих при высокой температуре под напряжением, проходит в условиях ползучести, следовательно, развитие разрушаемости можно представить рядом следующих друг за другом процессов: увеличение плотности дислокаций, образование микропор, формирование фрагментированной структуры, рекристаллизация зерен феррита, рост микропор, их объединение, образование микротрещин в результате объединения этих микропор и разрушение материала [4].

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

2.1 Обоснование метода, цель и задачи

В настоящее время в энергетике с каждым днем актуальнее становится проблема диагностики зарождения, накопления и развития повреждаемости стали энергетического оборудования на микроскопическом и субмикроскопическом уровне. Это обстоятельство требует вводить при анализе структурного состояния трубных поверхностей нагрева энергетических агрегатов такие параметры структуры, которые позволили бы реализовывать микроскопические подходы к оценкам внутренних физических структурных резервов металла, его надежности и долговечности в составе технологических установок. Только в этом случае, используя совокупность характеристик макро- и микроуровня, можно расширить представления о факторах и механизме разрушения, тем самым определить условия эксплуатации, продлевающие срок службы оборудования.

При анализе критериев прочности необходимо учитывать специальные параметры, отражающие индивидуальные особенности материала, изменяющиеся с переменной вида напряженного состояния объекта. Многие специалисты указывают на возникающую необходимость введения параметров субструктуры в анализ процессов, протекающих в тяжело нагруженных и сопряженных трением скольжения элементах оборудования, износостойкость которых обычно оценивается на основе анализа макрохарактеристик, что явно недостаточно. К параметрам субструктуры авторы относят период кристаллической решетки и физическое уширение рентгеновской линии [14].

Из оптики известно, что разрешающее расстояние d микроскопа определяется длиной волны λ , показателем преломления среды n и отверстием углом объектива φ :

$$d = \lambda / n \sin \varphi. \quad (1.1)$$

Отверстный угол объектива φ примерно равен 90 градусов, показатель преломления воздуха n равен 1, так что $d \approx \lambda$, т. е. разрешающая способность оптического микроскопа примерно равна длине волны света, т.е. $d = 0,6$ мкм. На практике же с учетом несовершенств оптической системы эта величина значительно больше и составляет порядка $d = 1$ мкм. Это говорит о том, что оптический микроскоп не способен различать детали структуры менее 1 мкм.

Методы просвечивающей электронной (ПЭМ) и растровой микроскопии (РЭМ) различают более мелкие детали структуры, менее 0,1 мкм. Изображение с помощью ПЭМ получают на репликах, которые являются лишь оттиском с поверхности объекта, воспроизводящим ее рельеф. Разрешение ПЭМ на практике с учетом несовершенств его оптической системы далеко не равно длине волны электронов, ускоряемых напряжением порядка 100–200 кВ, и составляет больше 30 Å.

В методе РЭМ – поверхность зондируется очень узким пучком электронов. Электроны ускоряются обычно напряжением порядка 50 кВ с длиной волны, ограничивающей разрешающую способность величиной от 70 до 100 Å.

Характерным дефектом микроструктуры является пора порядка 1 мкм, а характерным размером микроструктуры является параметр элементарной ячейки кристалла – несколько десятков нанометров. Следовательно, характерный размер длины волны «микроскопа» для исследования наноструктур должен быть хотя бы того же порядка.

В этом смысле, а также с целью повышения разрешающей способности, наиболее важным и перспективным является метод рентгеноструктурного анализа, в основу которого положена дифракция рентгеновских лучей, генерируемых рентгеновской трубкой, с характерными длинами волн порядка 0,07–0,1 нм, т.е. с длинами волн на уровне размера атома.

Таким образом, метод рентгеноструктурного анализа является методом высокого разрешения, который способен определять параметр элементарной ячейки кристалла нанометрических размеров, и весьма широко применим в современном материаловедении для установления структуры кристалла и структурного типа кристаллической решетки, что, в свою очередь, относится к числу самых простых из решаемых этим методом задач. Другие, уже более сложные задачи, например, идентификации фазового состава в сложных химических технологиях, также разрешаются с применением данного метода, так как здесь он является пока единственным, который способен различать не только отдельные фазы, но и полиморфные модификации фаз.

Спектр специальных проблем, которые доступны этому методу, крайне широк – это определение преимущественных ориентировок (текстур), установление фазовых превращений, Остальные задачи – это определение остаточных макронапряжений в покрытиях, определение штампуемости и технологической пластичности стали, а так же изучение субструктуры материала и плотности дислокаций.

По теме влияния дислокационной структуры на свойственную характеристику стали нужно отметить, что предел прочности твердого тела зависит доминирующим образом от нарушений в расположении атомов. Такие нарушения называются дислокациями, которые имеют главенствующую значимость для практических проблем. Развитие теории дислокаций и установление их роли в упрочнении и разрушении металлов потребовало развития физических методов анализа высокого разрешения. Возникли теории, которые позволяют оценить плотность дислокаций рентгеновским способом. Поиск критериев предразрушения и разрушения металла привел к выводу, что наиболее точной характеристикой повреждаемости является дислокационная структура.

В сущности, в настоящее время структура хрупких и вязких повреждений, явления ползучести и закономерности разрушаемости при

ползучести объясняются одним механизмом взаимодействия дислокаций между собой, с примесями и другими дислокациями, торможением и аннигиляцией дислокаций.

Движение дислокаций связано с силой Пайерлса [15] τ_p , зависящей и от фундаментальных постоянных металла, и от внутренней структуры, и, как итог, от тех воздействий, которые ведут к изменениям структуры. Этими воздействиями могут как внешние, так и внутренние неоднородные напряжения в структуре стали, развиваемые при нагреве при наличии градиентов температур. Внутренние напряжения обусловлены множеством структурных факторов. Напряжения I рода – зональные (межзеренные) – зависят от неравномерности концентраций (материальная неоднородность), фазовой неоднородности с различными коэффициентами термических линейных расширений фаз и упруго-пластическими свойствами, неоднородности пластических деформаций при изготовлении изделия, неоднородности температур. Напряжения II рода (микронапряжения в зернах) зависят от наличия неоднородности распределения кристаллитов по размерам, различия форм кристаллитов, наличия распределения ориентировок, концентрационной неоднородности. Фазы, которые возникают при старении стали, имеют не только отличную от основной фазы структуру, но и неравномерность выделения по объему, кристаллографическую текстуру по отношению к матричной фазе, отличаются их удельные объемы. Все это обуславливает возникновение внутренних напряжений как физической необходимости структурного согласования их границ. Внутренние же напряжения, если их рассматривать как характеристику структурного состояния, должны быть непосредственно связаны с прочностными свойствами. Вследствие этого анализ структурных напряжений металла, которые изменяются в процессе термических воздействий, представляет интерес как с точки зрения диагностики текущего состояния, так и с точки зрения прогнозирования свойств при той или иной температуре воздействия. Изучение структурно-напряженного состояния материала является,

следовательно, основой прогнозирования его поведения, основой продления его ресурса, а также основой для возможного восстановления его эксплуатационных свойств [22].

Микро- и макронапряжения в стали наиболее точно могут быть оценены методом рентгенографии.

Одним из преимуществ метода РСА (ВТР) является то, что он принадлежит к неразрушающим методам физического анализа в том смысле, что не требует специальной обработки поверхности материала, изготовления реплик, глубокого травления, следовательно, не вносит искажений в исходную микроструктуру и допускает повторные и даже многолетние обследования, что наиболее важно при исследовании распадов твердых растворов, т.е. процессов старения сплавов.

Уширения дифракционных рентгеновских отражений от кристаллических решеток дает возможность определять размер структурной составляющей зерна (диаметр кристаллита) и обнаружить внутренние собственные внутризеренные макронапряжения по величине физического уширения дифракционных линий.

На основе определения углового сдвига дифракционной линии возможно определение макронапряжений, дифференцируя тем самым внутренние структурные напряжения первого и второго рода.

Таким образом, учитывая круг поставленных в работе задач, которые могут быть решены только с применением метода рентгеновской дифракции, за базовый метод исследования в настоящей работе принят метод рентгеноструктурного анализа.

Исходя из изложенного, разрабатывается цель работы.

Цель: Определение текущего физического состояния и работоспособности котельной трубы из стали 12Х1МФ по величине и характеру изменения внутренних структурных напряжений при механических испытаниях труб циклическим пластическим деформированием после термоциклического старения.

Поставленная цель достигалась решением следующих задач:

- Установлением связи величины внутренних напряжений II рода от плотности структурных дефектов.
- Установлением влияния цикличности нагружения на перераспределение внутренних напряжений I рода.
- Установлением влияния цикличности нагружения на возникновение и увеличение микроструктурных трещин.

2.2 Определение периода кристаллической решетки

Множество процессов, которые происходят в кристаллических материалах, приводят к изменению кристаллической решетки, следовательно, это дает возможность изучать эти явления. Например, при термообработке возникают или распадаются (полностью или частично) твердые растворы. Из-за ряда воздействий весьма часто появляются упругие деформации. Измерение периода кристаллической решетки, которые выполняются с большой точностью, дают возможность судить о составе твердого раствора, границах растворимости, кинетике процессов распада, величине остаточных напряжений в деформированном или термообработанном материале. По периоду решетки закаленных образцов определяется концентрация вакансий при высоких температурах. По периодам решетки, которые измеряются при разных температурах, определяется коэффициент термического расширения.

Определение периода кристаллической решетки основывается на известном уравнении Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta, \quad (2.1)$$

где λ – длина волны используемого излучения,

θ – угол дифракции (экспериментальная величина),

d – межплоскостное расстояние.

Из этого уравнения определяется межплоскостное расстояние d для данной системы плоскостей (HKL) и по соотношению, которое связывает индексы (HKL) с межплоскостным расстоянием для данного типа кристаллической решетки, определяется ее параметр «а». Так для кристаллов с гранецентрированной кубической решеткой соотношение имеет вид

$$a = d \cdot \sqrt{H^2 + K^2 + L^2} . \quad (2.2)$$

Отсюда следует, что точность в определении параметра элементарной ячейки обусловлено точностью, с которой определяется угол дифракции.

Погрешность при измерении угла дифракции 2θ , как и любой другой физической величины, складывается из случайных и систематических погрешностей.

Исследование систематических погрешностей (смещение плоскости образца от оси гониометра, отклонение поверхности плоского образца от фокусирующей поверхности, вертикальная расходимость первичного и дифрагированного пучков, преломление, поглощение рентгеновских лучей, неточная установка нулевого положения детектора и так далее) [22, 26, 27] показывает, что почти все они стремятся к нулю при θ , стремящимся к 90° . Продифференцируем уравнение по d и θ

$$0 = 2 \cdot \Delta d \cdot \sin \theta + 2d \cdot \cos \theta \cdot \Delta \theta \quad (2.3)$$

(погрешность в определении длины волны не учитывается), откуда

$$\frac{\Delta d}{d} = -\operatorname{ctg} \theta \Delta \theta . \quad (2.4)$$

Из соотношения (2.4) получается, что при одной и той же погрешности определения Брэгговского угла θ относительная погрешность $\Delta d / d$ стремится к нулю при θ , стремящемся к 90° .

Измерение экспериментальным путем на этих углах невозможно, следовательно, межплоскостное расстояние, соответствующее этому углу, определяется с применением особых методов обработки результатов экспериментов, сводящихся к экстраполяции экспериментальных точек к 90° [22,24].

В случае кристаллов с кубической сингонией для определения периода решетки используется выражение (2.2), в котором межплоскостное расстояние рассчитывается на основе выражения (2.1) по дифракционной линии с максимальным углом дифракции θ .

3 УСТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦА СТАЛИ 12Х1МФ

3.1 Теоретические основы метода

Метод расчета размеров кристаллитов и распределений кристаллитов по размерам базируется на исследовании уширений профилей дифракционных линий, т.к. ширина линии, возникающая при монохроматической съемке поликристаллического образца, обратно пропорциональна среднему размеру кристаллита.

Ширина и форма линий зависит от физического уширения (размеров кристаллитов, их разбиения на малые, разориентированные относительно друг друга блоки, микроискажениями, дефектов упаковки) и геометрического или инструментального уширением (расходимость или сходимости пучка, ширина спектральной линии характеристического излучения).

Размер кристаллитов может быть рассчитан, исходя из истинной ширины линий, для которых исключено влияние геометрических факторов. Профиль истинного (физического) уширения линии может быть определен методом гармонического анализа формы линии (Фурье-преобразование) или другими, также трудоемкими методами.

Более доступным представляется метод, описывающий физический профиль линий функцией Фойгта [31, 32, 33].

Функция Фойгта $\Phi(S)$ представляется в общем виде сверткой функции Коши $K(S)$ и Гаусса $\Gamma(S)$ [31, 32, 33].

$$\Phi(S) = \frac{\beta \cdot [K(S) \cdot \Gamma(S)]}{\beta_K \cdot \beta_\Gamma}, \quad (3.1)$$

где β_K – интегральная ширина профиля, описываемого функцией Коши,
 β_Γ – интегральная ширина профиля, описываемого функцией Гаусса,

β – интегральная ширина профиля $f(s)$, описываемого функцией Фойгта.

На основе (3.1) объемное распределение кристаллитов $G(L)$ можно выразить:

$$G(L) = 2 \cdot L \cdot \left(2 \cdot (K \cdot \beta_K + \pi \cdot K^2 \beta_{\Gamma}^2 \cdot L)^2 - \pi \cdot K^2 \cdot \beta_{\Gamma}^2 \right) \cdot e^{-(2 \cdot K \cdot \beta_K^2 \cdot L + \pi \cdot K^2 \cdot \beta_{\Gamma}^2 \cdot L^2)}, \quad (3.2)$$

где L – текущий размер кристаллитов,

$$K = \frac{\cos \theta_0}{\lambda}.$$

Зависимость (3.2) может быть применена для анализа полидисперсности по профилям линий, аппроксимируемых функцией Фойгта.

Обычно для анализа внутренних напряжений и определения областей когерентного рассеивания применяют приемы, основанные на установлении физических уширений профилей двух дифракционных линий.

Тогда средний размер кристаллитов L определяется по известной формуле Селякова-Шеррера:

$$L = \frac{0,94 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta_0}. \quad (3.3)$$

Величину микронапряжений и размеров кристаллитов можно рассчитать количественно, если они влияют на ширину интерференционных линий одновременно. Истинное физическое уширение линии β связано с m -уширением, вызванным дисперсностью, и n – уширением, вызванным напряжениями, выражением [27, 30, 34]:

$$\beta = \frac{(m + 2 \cdot n)^2}{m + 4 \cdot n}, \quad (3.4)$$

так как уравнение содержит два неизвестных, необходимо использовать две линии рентгенограммы, для которых [27, 30, 34]:

$$\beta_1 = \frac{(m_1 + 2 \cdot n_1)^2}{m_1 + 4 \cdot n_1}, \quad \beta_2 = \frac{(m_2 + 2 \cdot n_2)^2}{m_2 + 4 \cdot n_2}, \quad (3.5)$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_2}. \quad (3.6)$$

Решив совместно данные четыре уравнения, находим:

$$\frac{m_1}{\beta_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + \sqrt{8 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + 1} \right), \quad (3.7)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + \sqrt{8 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + 1} \right) + 2 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} \cdot \frac{\operatorname{tg}\theta_2}{\operatorname{tg}\theta_1} \right]^2}{\frac{1}{2} \cdot \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + \sqrt{8 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} + 1} \right) + 4 \cdot \frac{n_1}{\beta_1} \cdot \frac{\operatorname{tg}\theta_2}{\operatorname{tg}\theta_1}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\frac{m_1}{2 \cdot m_2} \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{n_2}{\beta_2} + \sqrt{8 \cdot \frac{n_2}{\beta_2} + 1} \right) \cdot \frac{4 \cdot n_2 \cdot \operatorname{tg}\theta_1}{\beta_2 \cdot \operatorname{tg}\theta_2}}{\left(\frac{m_1}{2 \cdot m_2} \cdot \left[1 - 4 \cdot \frac{n_2}{\beta_2} + \sqrt{8 \cdot \frac{n_2}{\beta_2} + 1} \right] \cdot \frac{2 \cdot n_2 \cdot \operatorname{tg}\theta_1}{\beta_2 \cdot \operatorname{tg}\theta_2} \right)^2}. \quad (3.9)$$

Для выявления отдельного влияния дисперсности и микродеформаций на уширение профилей дифракционных линий выбираются два рефлекса.

Задавая величине n_1 / β_1 в выражении (3.7) значения 0, 0,1, 0,2 и так далее, определяются значения m_1 / β_1 . Задавая величинам n_1 / β_1 , n_2 / β_2 в выражениях (3.8) и (3.9) соответственно те же значения, находят отношение β_2 / β_1 .

По рабочему отношению β_2 / β_1 находят искомые величины n_2 и m_1 , необходимые для вычисления размеров кристаллитов D и определения средней величины микронапряжений σ_{II} по формулам [27, 30, 34]:

$$D = \frac{0,94 \cdot \lambda}{m_1 \cdot \cos\theta_1}, \quad \sigma_{II} = \frac{n_2}{4 \cdot \operatorname{tg}\theta_2} \cdot E, \quad (3.10)$$

где E – модуль нормальной упругости.

Плотность дислокаций ρ , $1/\text{см}^2$ оценивается из следующего выражения:

$$\rho = \frac{3}{D^2}, \quad (3.11)$$

где D – размер кристаллитов в сантиметрах.

3.2 Теоретическая оценка длины трещины при холодном циклическом деформировании

Для оценки разрушения зерна в ходе холодного деформирования образца используется формула Котрелла [35], с помощью которой можно найти длину зональной трещины $l_{зон}$, зависящей от внутренних напряжений первого рода σ_I и длину интеркристаллитной трещины L , зависящей от внутренних микронапряжений второго рода σ_{II} :

$$L = \frac{2 \cdot \gamma \cdot G}{\pi \cdot (1 - \mu) \cdot \sigma_n^2}, \quad (3.12)$$

где $\gamma = 2 \cdot 10^{-4}$ – поверхностная энергия, кг/см²;

$$\gamma = 0,1 \cdot G \cdot b \quad (3.13)$$

где b – диаметр атома железа, $b = 2,48 \cdot 10^{-8}$ см,

$G = 8 \cdot 10^{-4}$ – модуль сдвига, кг/см²;

$\mu = 0,27$ – коэффициент Пуассона;

σ_n – приложенное растягивающее напряжение, МПа.

7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью экономической части данной научно-исследовательской работы является расчёт ее себестоимости. Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач:

- спланировать работы по НИР;
- рассчитать основную заработную плату участников, социальные отчисления, амортизацию и прочие затраты;
- рассчитать себестоимость НИР.

7.1 Организация и планирование НИР

Планирование работы заключается в составлении перечня работ, которые необходимы для выполнения поставленных в данной работе задач, определении количества участников каждой работы, установлении продолжительности работ в рабочих днях, построении линейного графика и его оптимизации [39].

Для того, чтобы выполнить НИР в срок при наименьших затратах средств, составляется план, в котором устанавливается количество участников по этапам, т.е. устанавливается фронт работы. Количество участников должно быть максимальным условиям выполнения того или иного этапа, В тоже время на каждом этапе должны участвовать только те работники, которые действительно необходимы для проведения данного этапа в соответствии со своей специализацией.

Состав и структура длительности НИР представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Состав и структура длительности НИР

Наименование работ	Продолжительность, %
1. Научно-теоретические исследования:	
Обоснование методики исследования	5
Разработка теоретической части темы	12
Подготовка к эксперименту	20
Экспериментальные работы	40
Анализ, выводы и предложения	10
Завершающий этап	5
2. Экспериментальные работы:	
А) Изготовление образца из трубной стали	5
Б) Съемка рентгенограммы (27 точек)	3
ИТОГО:	100

Для определения ожидаемого значения продолжительности работы применяют формулу, основанную на использовании двух оценок:

$$t_{\text{ож.}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5},$$

где t_{min} – кратчайшая продолжительность работы;

t_{max} – самая длительная продолжительность работы.

Планирование НИР представлено в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Планирование НИР

Наименование работ	Продолжительность работ, дни			Исполнитель
	t_{min}	t_{max}	$t_{\text{ож}}$	
1	2	3	4	5
Постановка задач	1	1	1	Руководитель группы
Ознакомление с литературой	7	14	10	Инженер
Анализ исходной информации	6	8	7	Инженер
Наладка оборудования	7	14	10	Техник, лаборант
Наработка оборудования на отказ, устранение неисправностей	7	7	7	Техник, лаборант

Продолжение таблицы 7.2

1	2	3	4	5
Эксперимент	45	55	49	Лаборант
Обработка результатов	14	20	16	Лаборант
Обработка результатов	14	20	16	Программист
Анализ результатов, выводы	5	7	6	Инженер
ИТОГО:	106	146	122	

7.2 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал

Рассчитывается смета расходов, включающая затраты на приобретение необходимого оборудования для проведения НИР и текущие расходы [39].

Затраты, образующие себестоимость работ, группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

- материальные затраты;
- затраты на оплату труда (таблица 7.3);
- отчисления на социальные нужды;
- амортизация основных фондов и нематериальных активов;
- прочие затраты.

Таблица 7.3 – Основная заработная плата участников НИР

Наименование работ	Трудоемкость, чел. дни					Дневная ставка, руб.	Суммарная заработная плата, руб.
	Руководитель	Инженер	Техник	Лаборант	Программист		
Постановка задач	1					300	300
Ознакомление с литературой		10				175	1750
Анализ исходной информации		7				175	1225
Наладка оборудования			10			175	1750
				10		150	1500
Наработка на отказ, устранение неисправностей			7			175	1225
				7		150	1050
Эксперимент				49		150	7350
Обработка результатов				16		150	2400
Обработка результатов					16	175	2800
Анализ результатов, выводы		6				175	1050
ИТОГО	1	23	17	82	16	1950	22400

Для больших работ целесообразно применять линейный график (таблица 7.4).

Таблица 7.4 – Линейный график НИР

Должность	Дни												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Руководитель	[График: 1 день на 10-й день]												
Инженер	[График: 10 дней на 10-й день, 1 день на 120-й день]												
Техник	[График: 10 дней на 20-й день]												
Лаборант	[График: 80 дней на 20-й день]												
Программист	[График: 10 дней на 100-й день]												

Календарный план-график выполнения НИР показан в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Календарный план-график выполнения НИР

Наименование работ	t _{ож} , дни	Удельный вес		Дни	Должность
		%	Нарастающий %		
Постановка задач	1	0,82	0,82	[График: 1 день на 10-й день]	Руководитель
Ознакомление с литературой	10	8,20	9,02	[График: 10 дней на 10-й день]	Инженер
Анализ исходной информации	7	5,74	14,76	[График: 7 дней на 10-й день]	Инженер
Наладка оборудования	10	8,20	22,96	[График: 10 дней на 20-й день]	Техник, лаборант
Наработка на отказ, устранение неисправностей	7	5,74	28,70	[График: 7 дней на 30-й день]	Техник, лаборант
Эксперимент	49	40,16	68,86	[График: 49 дней на 50-й день]	Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	81,97	[График: 16 дней на 100-й день]	Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	95,08	[График: 16 дней на 110-й день]	Программист
Анализ результатов, выводы	6	4,92	100	[График: 6 дней на 120-й день]	Инженер
Итого	125	100			

7.3 Ведомость затрат на НИР

7.3.1 Материальные затраты:

Дрон 3.0 – 2280000 руб.,

Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб.,

Потенциометр – 5400 руб.,

Милливольтметр – 2700 руб.

Итого: $K_{\text{мат.зат}} = 3228100$ руб.

7.3.2 Затраты на оплату труда

$Z_{\text{осн}} = 22400$ руб.,

$Z_{\text{доп}} = 0,1 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,1 \cdot 22400 = 2240$ руб.,

$P_{\text{коэф.}} = 0,3 \cdot 22400 = 6720$ руб.,

$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + P_{\text{коэф.}} = 31360$ руб.

7.3.3 Отчисления на социальные нужды

$C_{\text{нужды}} = 0,27 \cdot Z_{\text{общ}} = 8467,2$ руб.

7.3.4 Амортизация основных фондов

$U_{\text{аморт}} = 0,11 \cdot K_{\text{мат.зат}} \cdot (\text{вр.экспл.обор.} + \text{вр.наладки}) =$
 $= 0,11 \cdot 3228100 \cdot 0,085 = 30182,74$ руб.

7.3.5 Прочие затраты

Оплата электрической и тепловой энергии, оплата за воду

$U_{\text{электр.уст.}} = N_{\text{уст.}} \cdot t_{\text{вр.}} \cdot C_{\text{электр.}} =$
 $= 5 \text{ кВт/час} \cdot 448 \text{ час} \cdot 2,93 \text{ руб./кВт/час} = 6563,2$ руб.,

$U_{\text{электр.освещ.}} = 0,6 \cdot 10 \cdot 82 \cdot 2,93 = 1441,56$ руб.,

$U_{\text{на тепло}} = 1061,54 \cdot 4 = 4246,16$ руб.,

$U_{\text{на воду}} = 183,5 \cdot 4 = 734$ руб.

7.3.6 Командировочные расходы:

$U_{\text{команд.}} = 0,12 \cdot Z_{\text{общ}} = 0,12 \cdot 31360 = 3763,2$ руб.

7.3.7 Представительские расходы

$U_{\text{предст.}} = 0,02 \cdot (Z_{\text{общ}} + C_{\text{нужды}} + U_{\text{аморт.}}) =$

$$=0,02 \cdot (31360 + 8467,2 + 30182,74) = 1400,20 \text{ руб.}$$

7.3.8 Затраты на обеспечение нормальных условий труда и ТБ

$$З_{тб}=0,1 \cdot З_{общ}=0,1 \cdot 31360 = 3136 \text{ руб.}$$

7.3.9 Расходы, связанные с управлением

$$P_{упр.}=1,5 \cdot З_{общ}=1,5 \cdot 31360 = 47040 \text{ руб.}$$

7.3.10 Себестоимость по НИР

$$\begin{aligned} C &= K_{\text{мат.зат.}} + З_{\text{общ}} + C_{\text{нужды}} + U_{\text{аморт.}} + U_{\text{электр.уст.}} + U_{\text{электр.освещ}} + \\ &+ U_{\text{на тепло}} + U_{\text{на воду}} + U_{\text{команд}} + U_{\text{предст}} + З_{\text{тб}} + P_{\text{упр.}} = \\ &= 3228100 + 31360 + 8467,2 + 30182,74 + 6563,2 + 1441,56 + 4246,16 + \\ &+ 734 + 3763,2 + 1400,20 + 3136 + 47040 = 3366434,26 \text{ руб.} \end{aligned}$$

На основе приведенных расчетов составлена общая смета затрат (Таблица 7.6).

Таблица 7.6 – Общая смета затрат на НИР

Наименование	Затраты, руб.
Материальные затраты:	
Дрон 3.0	2280000
Высоковольтный источник питания (ВИП)	940000
Потенциометр	5400
Милливольтметр	2700
Итого материальных затрат	3228100
Затраты на оплату труда:	
Основная зарплата	22400
Дополнительная зарплата	2240
Районный коэффициент	6720
Итого затрат на оплату труда	31360
Отчисления на социальные нужды	8467,2
Амортизация основных фондов	30182,74
Прочие затраты:	
Электрическая и тепловая энергия, вода	12981,92
Командировочные расходы	3763,2
Представительские расходы	1400,20
Затраты на обеспечение нормальных условий труда и ТБ	3136
Расходы, связанные с управлением	47040
Итого	3366434,26

В результате расчета себестоимости научно-исследовательской работы, определены участники и построены линейные и календарные графики, посчитана общая смета затрат. В конечном итоге себестоимость выполненной НИР определена и составляет 3366434,26 руб.

Приложение Б
Список публикаций

1 Новгородцев А. А., Левин А. А., Литвиненко Н. Н. Исследование структурной неустойчивости труб пароперегревателя [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5–9 Октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – Т. 1 – С. 115-117.