

**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
«Исследования сопротивления упругопластическому деформированию материалов для энергомашиностроения»

УДК 621.774.02: 539.3: 621.1.002.5.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Часовников Николай Владимирович		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	Д.Т.Н., профессор		

## Запланированные 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

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Р4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	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
<b>Профессиональные компетенции</b>		
Р6	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
Р7	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
Р8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования,	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6),

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	технические испытания и (или) сложные 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	Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	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
P10	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 130303 Энергетическое машиностроение  
 Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
 (Подпись) \_\_\_\_\_ (Дата) Заворин А.С.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Часовникову Николаю Владимировичу

Тема работы:

Исследования сопротивления упругопластическому деформированию материалов для энергомашиностроения
---

Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.16, № 715/с
---	-------------------

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

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Труба пароперегревателя парового котла</li> <li>Энергетическая трубная жаропрочная низколегированная перлитная сталь марки 12Х1МФ</li> <li>Сталь после естественного старения в нормальных условиях</li> <li>Исследование процесса пластического холодного циклического деформирования</li> </ol>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Введение (Обоснование необходимости исследований трубной энергетической стали. Актуальность исследований, методика и средства исследований. Постановка цели и задач исследования).</li> <li>Обзор литературы по проблеме диагностики и оценки остаточного ресурса особо опасных производственных объектов.</li> <li>Обоснование методики и методов исследования.</li> <li>Экспериментальные результаты исследования. Обсуждения, выводы и заключения.</li> <li>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> <li>Социальная ответственность.</li> <li>Заключение, в т.ч. на иностранном языке.</li> </ol>
<b>Перечень графического</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Графическая часть представлена в презентации</li> </ol>

<b>материала (формата А1)</b>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Романцов Игорь Иванович
Иностранный язык	Кобенко Юрий Викторович
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Реферат	
Прогнозирование работы металлов пароперегревателя в процессе эксплуатации. Цели и задачи исследований.	
Заключение	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	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	Часовников Николай Владимирович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ВМ4Б	Часовникову Николаю Владимировичу

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

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

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

**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:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ВМ4Б	Часовников Николай Владимирович		

## Реферат

Диссертационная работа состоит из 108 страниц, 38 источников, 22 таблиц, 28 рисунков, одного приложения.

Ключевые слова: сталь, упругопластическое деформирование, внутренние структурные напряжения I-го и II-го рода, среднеквадратичное смещение атомов, структурная трещина, диагностика.

С целью обеспечения надежной работы элементов тепломеханического оборудования, повреждаемых вследствие ползучести, усталости, коррозионного растрескивания, исследованы рентгенодиагностические признаки сопротивления упругопластическому деформированию стали 12Х1МФ перлитного класса.

Экспериментальные исследования выполнены методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском аппарате ДРОН-3.0 с применением спектрального рентгенофлуоресцентного анализатора EDX-2800.

По результатам исследований сформулированы научная новизна, практическая значимость, выводы и 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;

(*hkl*) – индексы Миллера атомной плоскости;

$E$  – модуль нормальной упругости, МПа;

$G$  – модуль упругости при сдвиге, МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$d$  – межплоскостное расстояние, Å ;

$a$  – параметр элементарной ячейки, Å ;

$\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, Å ;

$b$  – межатомное расстояние, Å ;

$\theta$  – угол дифракции, град;

$\theta_{ц.т}$  – центр тяжести дифракционного максимума, град;

$\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;

$B_{0.5}$  – полуширина дифракционной линии, град;

$b_{0.5}$  – инструментальная полуширина, град;

$T$  – температура, К;

$m$  – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная дисперсностью, рад;

$n$  – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная микронапряжениями, рад;

$\sigma_I$  – макронапряжения I рода, МПа;

$\sigma_{II}$  – микронапряжения II рода, МПа;

$\sigma_B$  – временное сопротивление, МПа;

$\sigma_{0.2}$  – условный предел текучести, МПа;

$D$  – средний размер кристаллита, Å ;

## Оглавление

Введение.....	14
1 Прогнозирование работы металлов пароперегревателя в процессе эксплуатации. Цели и задачи исследований.....	17
2 Обоснование метода. Теоретические основы метода.....	25
2.1 Методика рентгенодиагностики.....	29
2.2 Методика определения размеров кристаллитов и внутренних микронапряжений II рода по уширению дифракционных линий с учетом микроискажений и дисперсности.....	32
2.3 Оценка макронапряжений I рода (зональных).....	35
2.4 Теоретическая оценка длины трещины.....	35
2.5 Оценка среднеквадратичных смещений атомов при циклическом деформировании.....	36
2.6 Методика определения параметра элементарной ячейки кристалла	36
3 Методика испытаний циклическим механическим деформированием.....	37
4 Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	41
4.1 Спектральный анализ.....	41
4.2 Определение среднеквадратичных смещений в процессе холодного деформирования.....	54
4.3 Установление распределений внутренних напряжений второго рода.....	56
4.4 Установление распределений внутренних напряжений первого рода.....	59
4.5 Оценка длины зональной трещины.....	61
4.6 Оценка длины кристаллитной трещины.....	63
4.7 Установление распределений плотности дислокаций.....	65
5 Выводы и рекомендации.....	69
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность,	

ресурсосбережение.....	70
6.1 Организация и планирование НИР.....	70
6.2 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал.....	70
6.3 Смета затрат на НИР.....	75
7 Социальная ответственность.....	77
7.1 Промышленная санитария.....	77
7.2 Система вентиляции.....	78
7.3 Система освещения.....	78
7.4 Защита от шума .....	83
7.5 Рентгеновское излучение.....	84
7.6 Биологическое действие ионизирующих излучений и лучевые заболевания .....	84
7.7 Электро- и пожаробезопасность .....	86
Заключение.....	90
Список публикаций студента.....	92
Список использованных источников.....	93
Приложение А.....	97

## Введение

Развитие научно-технического прогресса на рубеже XX–XXI века привело к значительному увеличению энергонапряжённости машин и механизмов в энергетике. Это, в свою очередь, обусловило необходимость создания новых жаропрочных материалов с ресурсной стабильностью в ужесточаемых условиях высоких температур, давлений, сложных и переменных действующих напряжений [1–7].

Обеспечение надёжной работы энергетического оборудования тепловых электрических станций с каждым годом становится более важным, так как оборудование стареет быстрее, чем вводятся новые мощности. В настоящее время оборудование выработало свой расчетный ресурс 100 тыс. ч. и парковый (от 150 до 300 тыс. ч.) [8]. В этих условиях, когда финансирование отрасли недостаточно, весьма большую актуальность приобретает надёжность и безопасность работы устаревшего оборудования. При этом большое значение имеют вопросы надёжной диагностики.

В связи с физическим и моральным износом оборудования отмечается [9], что ситуация в энергетике чревата одновременным выходом из строя электрогенерирующего оборудования и речь уже идет о прямой угрозе энергетической безопасности России. Поэтому одной из основных проблем энергетики является поддержание оптимального баланса между вводимыми в эксплуатацию мощностями и реконструкцией и модернизацией старых действующих электростанций.

В этой ситуации рассматривается путь продления срока службы оборудования путем замены отдельных элементов, проведения восстановительного ремонта, снижением параметров пара и проведением восстановительной термической обработки основных элементов теплотехнического оборудования, что, в свою очередь, потребует надёжной диагностики и научно обоснованной оценки фактического состояния механических и ресурсных свойств металла.

Надежности и ресурсу металла придается в настоящее время огромное значение вплоть до пересмотра технических условий на все виды трубной продукции. Отмечается [9], что вплоть до настоящего времени оценка качества поверхности труб остается весьма субъективной, вследствие чего при входном контроле на промышленных предприятиях и котельных заводах обнаруживаются недопустимые дефекты. Все эти обстоятельства указывают, не столько на низкую эксплуатационную надежность применяемых в трубно-оболочечных элементах перлитных и аустенитных сталей, сколько на специфичные технологические дефекты, которые будут развиваться в процессе эксплуатации теплообменных устройств, и приводить к деградации жаропрочных свойств, снижению тепловых мощностей и внутрискрутурному разрушению элементов конструкций.

Основными направлениями реновации теплосилового оборудования [2] являются продление ресурса и техническое перевооружение. Задачи продления ресурса связаны, прежде всего, с диагностикой фактического состояния металла. Проведенные диагностические обследования устаревшего энерготехнологического оборудования показали, что свойства сталей при наработках свыше 100 000 часов существенно не ухудшаются, и что многие из них еще имеют запас по длительной прочности, что и оправдывает технические решения на двух-трех кратное продление срока эксплуатации в соответствии с документом «Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС.

Основой продления ресурса является восстановительная термическая обработка металлов, снятие поврежденного поверхностного слоя металла в зонах концентрации напряжений, при этом исследуются структура, теплофизические и механические свойства, накопленная повреждаемость, проводится расчетная оценка термического сопротивления, напряженного состояния и остаточного срока службы. Конечно, такой путь реновации закладывает моральное отставание, приводит к повышению цен и тарифов,

но очевидно, что разумные призывы увязывать продление ресурса с техническим перевооружением не могут быть реализованы при сохраняющемся сокращении капиталовложений.

Задачи оценки фактических запасов прочности и состояния металла теплообменных поверхностей, диагностики остаточного, а также длительного ресурса, связаны с оценкой напряженного состояния материалов теплонапряжённых поверхностей, а, следовательно, приобретают в настоящее время особенную актуальность.

Таким образом, на первый план выступает надежная, научно-обоснованная диагностика состояния материалов.

## 1 Прогнозирование работы металлов пароперегревателя в процессе эксплуатации. Цели и задачи исследований

Производство работ по изготовлению, монтажу, ремонту и контролю трубопроводов, коллекторов пароперегревателя, испарителя, экономайзера, программа технического диагностирования основных элементов паровых котлов на ТЭС регламентируется такими нормативными документами как «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей», «Правила устройства безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды», «Правилами производства и приемки работ. Технологическое оборудование» и др. [10, 11, 12, 13]. В соответствии с этими документами предусматривается следующий объем контроля качества стальных материалов (листовая сталь, поковки, штамповки, прокат, трубы, сварные соединения):

- визуальный и измерительный;
- ультразвуковой и магнитопорошковый;
- цветная дефектоскопия;
- стилоскопирование;
- измерение твердости;
- механические, металлографические исследования;
- испытания на межкристаллитную коррозию;
- гидравлические испытания.

Сварные соединения подвергаются контролю различными методами: внешнему осмотру, цветной дефектоскопии, магнитно-порошковой дефектоскопии, контролю проникающим излучением, ультразвуковому контролю, механическим испытаниям, металлографическим исследованиям и испытанию на межкристаллитную коррозию, а также контролю на герметичность. Методы и объем контроля каждым методом устанавливаются нормативно-технической документацией.

Внешнему осмотру подвергаются все сварные соединения и зона термического влияния сварки. Внешним осмотрам сварных швов выявляются поверхностные дефекты металла и сварных швов, деформации конструкций. Внешний осмотр выявляет наружные дефекты – трещины, наплывы и подрезы, поры и шламовые включения, непровары и другие дефекты. Внешний осмотр проводят невооруженным глазом, а в сомнительных местах лупой с 4–7-кратным увеличением.

Спектральный анализ (стилоскопирование) выполняется для подтверждения в стали и сварном шве требуемого содержания легирующих элементов. Обязательному стилоскопированию подвергаются все вновь устанавливаемые детали энергетического оборудования, предназначенные для работы при температуре выше 450 °С, а также все детали и материалы, которые по проекту должны быть выполнены из легированной стали (кремнемарганцовистой, хромомолибденовой, хромомолибденованадиевой). Объем стилоскопирования устанавливается в соответствии с требованиями РТМ-1с [14]. В случае получения неудовлетворительных результатов стилоскопирования проводится повторный анализ тех же сварных соединений на удвоенном количестве точек (участков). При неудовлетворительных результатах повторного контроля производится спектральный или химический анализ деталей и металла шва, результаты которого считаются окончательными.

Контроль проникающим излучением заключается в регистрации на рентгеновской пленке локальных затемнений или светлых участков от дефектов в результате прохождения сквозь обследуемое сварное соединение коротковолновых электромагнитных колебаний при рентгеновском и/или гамма-излучении. При контроле не выявляются трещины и непровары, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением излучения (с отклонением луча свыше 7°).

Ультразвуковой контроль основан на регистрации в виде импульса на экране прибора отраженной от дефекта энергии ультразвуковых колебаний

частотой 0,6–10 МГц. Ультразвуковой контроль разработан и применяется для оценки качества сварных соединений различных типоразмеров, в том числе, для стыковых сварных соединений равно- и разнотолщинных трубных элементов, штуцерных и тройниковых сварных соединений. Этот метод дефектоскопии считается практически единственным, с помощью которого имеется возможность достаточно оперативно определять качество сварных соединений по всему сечению металла швов. Оценку качества сварных соединений по результатам ультразвуковой дефектоскопии проводят в соответствии с существующими нормами.

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) основана на способности ферромагнитных частиц, находящихся в магнитном поле, ориентироваться в направлении поля и скапливаться в местах наибольшей плотности магнитного потока в зоне расположения поверхностных и подповерхностных дефектов[15, 16, 17].

Цветная дефектоскопия заключается в получении на белом меловом покрытии, нанесенном предварительно на обследуемую поверхность металла, цветного (красного) рисунка, повторяющего очертания несплошностей типа макротрещин и других дефектов. В качестве красителя используется окрашивающая жидкость – пенетрант. При ЦД требуется очистка поверхности металла от жиров, загрязнений, окалины, влаги.

На отполированную поверхность металла наносится пенетрант и выдерживается 10–15 мин для проникновения его в несплошности.

Окрашивающая жидкость смывается с поверхности металла 5 %-ным водным раствором кальцинированной соды и просушивается, после чего на обследуемую поверхность металла наносится тонкий слой мелового покрытия (например, 300 г тонкоизмельченного мела на 1 л спирта).

Заключительной является операция визуального контроля, который проводится сразу после высыхания мелового покрытия, а второй раз – через 20–25 мин.

Метод магнитной памяти металла основан на выявлении локального усиления остаточного магнитного поля и смены его полярности в зонах концентрации напряжений и деформации металла, что преобразуется в виде импульсов на осциллограммах приборов.

Разрушающие методы контроля включают определение твердости металла шва, испытания механических свойств, металлографические исследования и исследования на стойкость против межкристаллитной коррозии.

Определение твердости металла проводится для проверки качества термической обработки сварных соединений или качества подогрева в случае приварки штуцеров (труб) к коллекторам из хромомолибденованадиевой стали без последующей термообработки. Твердость устанавливается по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59 (ИСО/Р 79-73), Виккерса или Роквелла. Замеру твердости в соответствии с РТМ-1с подлежат поверхности сварных швов труб.

Испытания механических свойств производятся для сварных соединений и наплавленного металла по ГОСТ 8817-82 и включают испытания на статическое растяжение, на статический изгиб или на сплющивание, на ударный изгиб с надрезом образца по оси шва. Требуемый объем испытаний сварных образцов (количество контрольных сварных соединений) на механические свойства устанавливается в соответствии с [14] и [18].

Из каждого стыкового соединения (контрольного или производственного стыка) изготавливаются и испытываются два образца на растяжение, два образца на статический изгиб и три образца на ударный изгиб (с надрезом по центру шва).

Испытание на ударную вязкость не является обязательным для ТЭС – для элементов котлов с  $P_{\text{раб}}$  меньше  $100 \text{ кгс/см}^2$  и  $t_{\text{раб}}$  меньше  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  и трубопроводов пара и горячей воды 2–4 категорий, трубопроводов системы регулирования турбины, трубопроводов горючего газа, мазутопроводов,

маслопроводов, а также для всех сварных соединений с толщиной стенки труб менее 12 мм.

Металлографические исследования проводятся для определения физической сплошности сварного шва и микроструктуры зон сварного соединения [14, 18, 19].

Испытание на стойкость против межкристаллитной коррозии проводится для установления коррозионной стойкости сварных соединений (и наплавки) из аустенитной стали, работающих в коррозионных средах [20,15].

Специальные сварные образцы с высокой чистотой поверхности (не ниже 7 класса) кипятят в водном растворе медного купороса и серной кислоты в присутствии медной стружки в течение 24 ч и после промывки и сушки подвергают статическому изгибу на угол 90°. В заключение проводится визуальный осмотр поверхности образца в зоне изгиба с применением лупы 8–10 кратного увеличения. Отсутствие поперечных трещин на образце со стороны растянутого волокна указывает на стойкость сварного соединения против межкристаллитной коррозии [20, 15].

Контроль осуществляется для выявления сквозных дефектов сварных соединений и металлов, трещин, непроваров, прожогов и т.д. [21]. Используемые методы – масспектрометрический, галоидный, опрессовка газом, испытания вакуум-камерой [21].

Каждый из перечисленных процессов, суть которых изложена выше, являются частью общей проблемы оценки работоспособности.

Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода базируется на результатах обследования технического состояния, исследования механических свойств и микроструктуры металла, оценки фактической нагруженности основных несущих элементов трубопровода и гидравлического испытания пробным давлением.

Прогнозирование остаточного ресурса производится только для трубопровода, техническое состояние которого по результатам обследования и исследования механических свойств и структуры металла оценивается как удовлетворительное.

Тенденции продления ресурса оборудования вызывают необходимость совершенствования техники определения остаточного срока службы [22].

Однако, рассмотренные методы оценки остаточного ресурса и текущего физического состояния не дают однозначных результатов без расчетов на прочность.

Остаточный ресурс элементов трубопроводов определяется как разность между парковым и индивидуальным ресурсом, т.е. как дополнительный срок службы при продлении паркового ресурса, и сводится к установлению временного интервала перехода от второй, установившейся стадии, к третьей стадии ускоренного разупрочнения металла паропроводов.

Методика расчётов на прочность и нормы предыдущего поколения, приведенная в [23] и [24], предусматривает выполнение расчётов в прямом и обратном порядке. При прямом порядке расчётов определяется номинальная или допустимая толщина стенки по заданному или принятому расчётному давлению, при обратном порядке расчёта определяется величина допустимого давления по фактической или номинальной толщине стенки. Обратный порядок расчёта может быть назван контрольным расчётом.

В общем случае при конструкторском расчёте прочности (в прямом порядке) цилиндрических деталей, работающих под внутренним давлением и ослабленными отверстиями, задачами расчёта являются:

- обоснованный выбор марки стали;
- грамотное расположение отверстий и расчёт наибольшего диаметра неукрепленного отверстия  $d_0$  (решение вопроса о необходимости укрепления отверстий);
- расчёт номинальной толщины стенки  $s$  ;

– расчёт допустимого давления при проведении гидравлических испытаний  $[p]_h$  и сравнение его значения с пробным давлением при гидравлическом испытании  $p_h$ .

При конструкторском расчёте цилиндрических деталей без отверстий вторая задача отсутствует. Кроме того, нормы [23, 24] охватывают большое количество других деталей и их составляющих (доньшки, днища, отводы, тройники, цилиндрические детали с не радиальными отверстиями и т.д.).

В целом же при продлении ресурса расчёт на прочность является составляющей диагностики технического состояния оборудования, а сама по себе методика расчёта прочности не учитывает деградацию структуры после эксплуатации, но нормы [23] используются совместно с многочисленными нормативными документами, в которых это обстоятельство уже пытаются учесть (микротрещины, балльность структуры, твёрдость и т.д.).

Разрушение в процессе ползучести происходит последовательно. Накопившиеся повреждения в металле влекут за собой процессы зарождения и роста несплошностей (пор). Первоначальные поры образуются задолго до разрушения. Наиболее характерный механизм образования пор в теплоустойчивых сталях – зернограничное проскальзывание. Поры образуются, прежде всего, по границам ферритных зерен, в плоскости, перпендикулярной действию растягивающих напряжений.

Изменения, происходящие в микроструктуре металла, включают не только зернограничные явления, но фазовые и полиморфные превращения, обычно сопровождающиеся понижением характеристик кратковременной и длительной прочности, сопротивления ползучести. Характер снижения значений каждой характеристики индивидуален и зависит от разных факторов.

Многофакторность структурно-деградационных процессов и их влияние на прочностные и ресурсные характеристики трубных изделий из сталей и сплавов в полной мере не изучены, а необходимость предвидеть направления развития этих процессов требует при прогнозировании введения

в рассмотрение таких структурных параметров материала, которые однозначно определяют его текущее физическое состояние и способны предсказывать на этой основе его индивидуальный ресурс.

В качестве таких параметров могут быть применены структурные напряжения, роль которых в настоящее время или недооценивается или не учитывается в связи с отсутствием экспериментальных данных по этому вопросу.

Цель работы заключается в проведении комплекса лабораторных испытаний материалов энергетических установок методом форсированного искусственного старения механическим циклическим деформированием для установления рентгенодиагностических параметров как основы методологии индивидуальной диагностики состояния системы и ее остаточного ресурса.

Задачи исследования:

- установление распределения легирующих элементов в зависимости от циклического механического нагружения.
- установление среднеквадратичных смещений атомов кристаллической решетки.
- установление перераспределения внутренних напряжений первого рода от циклической нагрузки.
- установление перераспределения внутренних напряжений второго рода от циклической нагрузки и плотности дислокаций.
- определение теоретических значений длины зональной и интеркристаллитной трещины.

## 2 Обоснование метода. Теоретические основы метода

В настоящее время в энергетике все 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 труб 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, продляющие срок службы оборудования.

При анализе критериев прочности необходимо учитывать специальные параметры, отражающие индивидуальные особенности материала, не остающиеся неизменными с изменением вида напряженного состояния объекта. Многие специалисты указывают на возникшую 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 относится период кристаллической решетки и физическое уширение рентгеновской линии.

Из оптики известно, что разрешающее расстояние  $d$  микроскопа определяется длиной волны  $\lambda$ , показателем преломления среды  $n$  и отверстием углом объектива  $\varphi$ :

$$d = \lambda / n \sin \varphi.$$

Отверстный угол объектива  $\varphi$  примерно равен 90 град, показатель преломления воздуха  $n = 1$ , 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 70–100 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 устанавливать нанометрический размер элементарной ячейки кристалла. Данный метод широко применяется в современном материаловедении в основном для

определения структуры кристалла и структурного типа кристаллической решетки, что относится к числу самых простых из решаемых этим методом задач. Более сложные задачи, например, идентификации фазового состава в сложных химических технологиях, также решаются с применением этого метода, поскольку здесь он является пока единственным, способным различать не только отдельные фазы, но и полиморфные модификации фаз.

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

Одним из достоинств метода РСА (ВТР) является то, что он относится к неразрушающим методам физического анализа в том смысле, что не требует специальной подготовки поверхности образца, изготовления реплик, глубокого травления, следовательно, не вносит искажений в исходную структуру и допускает повторные и даже многолетние исследования, что особенно важно при изучении распадов твердых растворов, т.е. процессов старения сплавов.

Уширения дифракционных рентгеновских отражений от кристаллических решеток позволяют определять размер структурной составляющей зерна (диаметр кристаллита) и выявлять 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.

### 3 Методика испытаний циклическим механическим деформированием

Для установления зависимости распределения внутренних напряжений в металле от нагружения при холодном циклическом деформировании в качестве экспериментального применен образец стали 12Х1МФ перлитного класса. Химический состав перлитной стали 12Х1МФ по ГОСТ 20072-74 (по массе) приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав стали 12Х1МФ (по массе)

C, %	V, %	Si, %	Cu, %	Mo, %	Mn, %	Ni, %	P, %	Cr, %	S, %	Fe, %
0,15	0,30	0,37	0,20	0,35	0,70	0,30	0,025	1,20	0,025	–

Из трубы диаметром 32×5 мм, искусственно состаренной в нормальных условиях в течении порядка 13 лет, вырезался цилиндрический кусок длиной не более 10 см. Далее из этой части трубы выпиливалась образец, после чего его стачивали напильником для создания плоскости с обеих сторон, чтобы он имел плоскость, параллельную плоскости гониометра. В результате образец принял размеры 21,3×14,1×2,4мм (рис. 3.1)

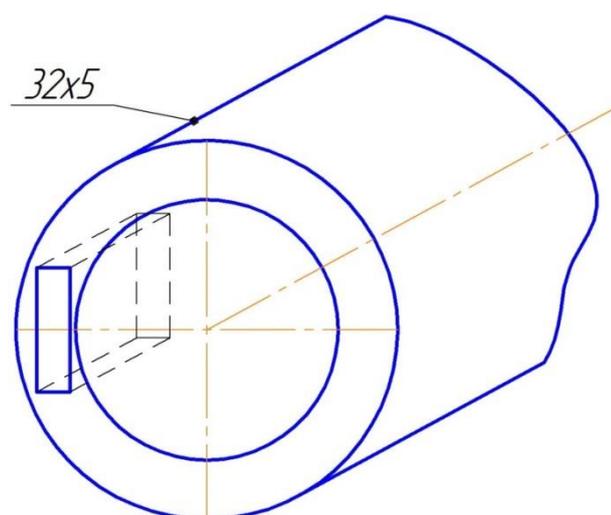


Рисунок 3.1 – Образец трубной стали 12Х1МФ

После получения нужных размеров, на исследуемом образце были выполнены засечки, обозначающие принадлежность сторон образца сторонам трубы (1 засечка – сторона внешняя, 2 засечки – внутренняя). Также на образец были нанесены по четыре равноудаленные друг от друга засечки на каждой стороне для дальнейших мероприятий на спектрометре (рис. 3.2).

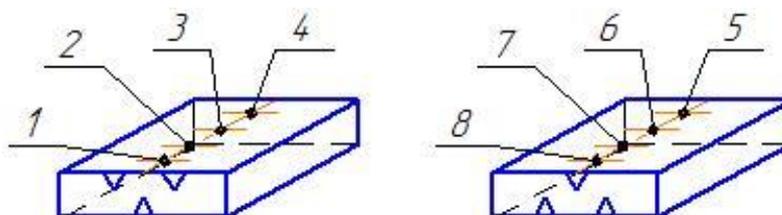


Рисунок 3.2 – Исследуемый образец стали 12Х1МФ

## 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, 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.

### 6.1 Организация и планирование НИР

Планирование работы включает в себя составление перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи, определение участников каждой работы, установлении продолжительности работ в рабочих днях, построении линейного или сетевого графика и его оптимизации [36].

Для того, чтобы выполнить НИР в срок при наименьших затратах средств, составляется план, в котором устанавливается число участников работы по этапам, т.е. определяется фронт работы. Число участников должно быть максимально возможным по условиям выполнения того или иного этапа, с другой стороны, на каждом этапе должны участвовать только те работники, которые действительно необходимы для проведения данного этапа в соответствии со своей специализацией.

### 6.2 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал

Рассчитывается смета расходов, включающая затраты на приобретение необходимого оборудования для проведения НИР и текущие расходы [36].

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

- материальные расходы;
- расходы на оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;
- амортизация основных фондов и нематериальных активов;
- прочие затраты.

Состав и структура длительности НИР представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Состав и структура длительности НИР

Наименование работ	Продолжительность, %
1. Научно-теоретические исследования:	
Обоснование методики исследования	5
Разработка теоретической части темы	12
Подготовка к эксперименту	23
Экспериментальные работы	45
Анализ, выводы и предложения	10
Завершающий этап	5
Итого:	100
2. Экспериментальные работы:	
А) Изготовление образца из трубной стали;	5,5
Б) Съемка рентгенограммы (25 точек)	4,5
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  $t_{\text{min}}$  – кратчайшая продолжительность работы;

$t_{\text{max}}$  – самая длительная продолжительность работы.

Планирование НИР представлено в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Планирование НИР

Наименование работ	Продолжительность работ, дни			Исполнитель
	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	
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
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	

Основная заработная плата участников НИР представлена в таблице

6.3.

Таблица 6.3 – 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
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>17</b>	<b>82</b>	<b>16</b>	<b>1950</b>	<b>22400</b>

Линейный график представлен в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Линейный график НИР

Должность	Дни												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Руководитель													
Инженер													
Техник													
Лаборант													
Программист													

Календарный план-график выполнения НИР показан в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Календарный план-график выполнения НИР

Наименование работ	t <sub>ож</sub> , дни	Удельный вес		Дни	Должность
		%	Нарастающий, %		
Постановка задач	1	0,82	0,82		Руководитель
Ознакомление с литературой	10	8,20	9,02		Инженер
Анализ исходной информации	7	5,74	14,76		Инженер
Наладка оборудования	10	8,20	22,96		Техник, лаборант
Наработка на отказ, устранение неисправностей	7	5,74	28,70		Техник, лаборант
Эксперимент	49	40,16	68,86		Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	81,97		Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	95,08		Программист

Анализ результатов, выводы	6	4,92	100		Инженер
Итого	122	100			

### 6.3 Смета затрат на НИР

#### 6.3.1 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.

#### 6.3.2 Затраты на оплату труда

$$Z_{\text{осн}} = 22400 \text{ руб.},$$

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

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

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

#### 6.3.3 Отчисления на социальные нужды

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

#### 6.3.4 Амортизация основных фондов

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

#### 6.3.5 Прочие затраты

Оплата электрической и тепловой энергии, оплата за воду

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

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

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

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

#### 6.3.6 Командировочные расходы:

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

### 6.3.7 Представительские расходы

$$U_{\text{предст.}} = 0,02 \cdot (Z_{\text{общ}} + C_{\text{нужды}} + U_{\text{аморт.}}) = \\ = 0,02 \cdot (31360 + 8467,2 + 30182,74) = 1400,20 \text{ руб.}$$

### 6.3.8 Затраты на обеспечение нормальных условий труда и ТБ

$$Z_{\text{ТБ}} = 0,1 \cdot Z_{\text{общ}} = 0,1 \cdot 31360 = 3136 \text{ руб.}$$

### 6.3.9 Расходы, связанные с управлением

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

### 6.3.10 Себестоимость по НИР

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

В ходе работы был произведен расчет себестоимости научно-исследовательской работы, проведена планировка выполнения работ, определены участники и построены линейные и календарные графики. В конечном итоге себестоимость данной НИР определена и составляет 3366434,26 руб.

## Список публикаций студента

1 Часовников Н.В., «Тепловые дилатации кристаллических решеток конструкционных материалов для энергомашиностроения»/ Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5–9 октября 2015 г.: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Т. 1. – [С. 183–185].

2 Любимова Л.Л., Ташлыков А.А., Фисенко Р.Н., Часовников Н.В., «Чувствительность внутренних напряжений к процессам старения теплообменных поверхностей нагрева котлов»/ Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2–4 декабря 2015 г., Томск: в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Т. 1. – [С. 243–246].