

На правах рукописи



Редников Сергей Николаевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И
РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
МАШИН**

Специальность 05.02.13 –Машины, агрегаты и процессы (металлургия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный консультант: **ЗАКИРОВ Дильфат Минияхметович,**
доктор технических наук

Официальные оппоненты:

АРТЮХ Виктор Геннадиевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого», г. Санкт-Петербург.

ГОРБАТЮК Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»»,
г. Москва.

СТОЛБОВ Валерий Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»,
г. Пермь.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тулский государственный университет»

Защита состоится «5» сентября 2022 г., в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Терентьев Дмитрий Вячеславович

Введение

Актуальность темы

Повышение эксплуатационной надёжности агрегатов и узлов металлургических машин – проблема, решение которой позволяет добиться снижения издержек производства, обеспечивает рост производительности и улучшение качества выпускаемой отраслью продукции. Это непосредственно связано с повышением надёжности вспомогательного оборудования, прокатных станов, машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), высадочных прессов, иных металлургических агрегатов. Ни один современный металлургический комплекс не обходится без значительного количества узлов трения, таких как опоры валков прокатных станов, тяжёлых электродвигателей, элементов теплогенерирующего оборудования, механических и гидравлических приводов, требующих постоянного внимания обслуживающего персонала, как технологов, так и конструкторов. Гидравлические системы, применяемые в современных металлургических машинах, имеют рабочее давление свыше 45 МПа, что более чем вдвое превосходит давление подачи рабочей жидкости в системах, разработанных 20-25 лет назад. Безусловно, эксплуатации и ремонту этой техники уделяется значительное внимание, так как отказы при её эксплуатации прямо сказываются на себестоимости готовой продукции. Совершенствование систем диагностики, позволяющих выявлять параметрические отклонения на ранних стадиях развития дефектов, являются актуальной задачей.

При разработке теории надёжности и диагностики машин значительный след оставили работы Болотина В.В., Проникова А.С., Герцбаха И.Б., Решетова Д. Н., Дроздова Ю.Н., Труханова В.М., Анцупова В.П., Мазура И.П., Закирова Д. М., Платова С.И., Сидорова В.А. и многих других учёных. Работы по снижению стоимости эксплуатации техники в настоящий момент проводятся на заводах УГМК, ЧТПЗ, Норильского Никеля, АМРОСА, Альметьевском трубном, Синарском трубном заводе и других передовых предприятиях отрасли. Важность этих работ вызвана также интенсивным внедрением современной техники с высокими уровнями нагрузок в технологический цикл.

Степень разработанности

Анализ литературных источников показал наличие значительного числа работ как теоретического, так и экспериментального характера, посвящённых диагностике металлургического оборудования. Детально разработаны вопросы акустического контроля, ультразвуковой диагностики, вибрационной диагностики, неразрушающего контроля, пульсационной диагностики, псевдопластичного состояния вещества, структур рабочих жидкостей и смазок. Значительный вклад в исследование оценки состояния оборудования при высоких параметрах нагружения внесли коллективы под

руководством Алёшина Н.П., Ахматова А.С., Павлова Б.В., Гременика Г.М., Когаева В.П., Циклиса Д.С., Кучерова В.Г., Григорьева Б.А., Фролова К.В., Чиченева Н.А., Мустафьева Р.А., Фастыковского А.Р., Точилкина В.В. Для оценки степени надёжности металлургического оборудования в настоящее время хорошо проработаны статистические модели, полученные путём анализа отказов или методами обработки экспериментальных данных. Тем не менее, не полностью разработаны вопросы оценки остаточного ресурса при изменяемых условиях эксплуатации металлургического оборудования, созданного в последние десятилетия. Применяемые для оценки состояния оборудования модели, как правило, не учитывают структурных изменений в граничных слоях пар трения и изменения параметров рабочих сред и смазочных материалов при нагружении высокой интенсивности. Вопросы применения вибрационной диагностики, оценки тепловых полей, акустической диагностики прорабатывались вне комплексного подхода. Открытыми остаются вопросы комплексной первичной диагностики металлургического оборудования с учётом свойственных только для этой отрасли видов воздействий. Так, при анализе информационных источников не удалось выявить работ, посвящённых оценке надёжности систем управления металлургических агрегатов, оснащённых гидравлическим приводом, в условиях загрязнения рабочей жидкости окислами железа, являющимися базовыми загрязнителями в металлургии. Требуют проработки вопросы бесконтактных методов оценки состояния оборудования. Широко применяемые сегодня методы оценки состояния агрегатов по внешним тепловым полям, как правило, используют методы сравнения с заранее известными состояниями, характерными для наличия тех или иных дефектов. Методика расчётной объёмной локализации дефектов конструкций и агрегатов по оценке внешних тепловых полей практически не разработана. Вопросы комплексного развития методов тепловизионной диагностики, диагностики по состоянию рабочих жидкостей, по оценке токового потребления с точки зрения прогнозирования отказов металлургических машин и агрегатов, а также повышения эффективности работы остаются открытыми.

Объектом исследований в диссертационной работе являются элементы, узлы, рабочие среды систем металлургических машин, лимитирующие срок их службы, **предметом исследования** - научные и методологические принципы диагностирования узлов металлургических машин, технические решения, направленные на повышение эффективности оценки состояния оборудования.

Целью работы является научное обоснование, разработка и реализация технических решений для повышения эффективности метода оценки состояния металлургических машин, повышения точности

определения остаточного ресурса, на базе комплексного подхода для создания условий обеспечения надежной и безопасной их эксплуатации.

Задачи исследования

1. Научно обосновать подход и разработать методику первичного безразборного диагностирования элементов металлургических агрегатов, обладающей повышенной точностью прогнозирования ресурса и пониженными затратами на диагностирование.

2. Разработать методику оценки состояния элементов металлургических агрегатов при первичном диагностировании на основе анализа температурных полей объектов.

3. Повысить достоверность прогнозов состояния систем металлургических агрегатов на основе научного обоснования механизма изменения гидравлических характеристик рабочих сред, смазывающих материалов и теплоносителей.

4. Раскрыть и научно обосновать механизм влияния параметров рабочих жидкостей и смазочных материалов на характеристики элементов металлургических машин при пиковых режимах нагружения.

5. Обеспечить повышение уровня эксплуатационной надёжности металлургического оборудования на основе методики оценки гидравлических характеристик рабочих сред, в диапазоне давлений от 45 до 200 МПа.

6. Создать и внедрить методики оценки остаточного ресурса гидравлических систем исполнительных механизмов металлургических агрегатов на примере золотниковых пар распределителей.

7. Провести промышленное апробирование разработанных методик анализа состояния теплогидравлических систем с целью повышения ресурса металлургических агрегатов.

Научная новизна

1. Разработана методика комплексной оценки состояния тяжелонагруженных узлов металлургических машин и агрегатов, отличающаяся от известных корректирующими коэффициентами, с целью повышения точности прогнозов остаточного ресурса при проведении первичного безразборного диагностирования в меняющихся условиях эксплуатации, в зависимости от периода диагностики и вида диагностических мероприятий.

2. Разработана методология оценки состояния элементов металлургических агрегатов путём расчётного определения объемного распределения полей температур с использованием тепловизионного контроля, позволяющая локализовать зону критических дефектов, характеризующихся достижением предельных температур конструкционных материалов, либо температур вспышки рабочих жидкостей и смазочных

материалов принятой 160 °С, в целях обеспечения безопасной эксплуатации металлургического оборудования.

3. Разработана математическая модель и решена задача по оценке объёмных температурных полей элементов металлургических агрегатов с учётом гидравлических характеристик рабочих сред, смазывающих материалов и теплоносителей, позволяющая оценивать параметры функционирования элементов металлургических машин при предельных режимах эксплуатации. Отличие от известных моделей состоит в общей концепции комбинированной модели учёта движения жидких и газообразных сред и физико-химических процессов, протекающих в этих средах при экстремальных динамических нагрузках.

4. Впервые предложены научно обоснованная методика диагностики и технические решения её реализации, позволяющие определять предельные режимы эксплуатации металлургических машин и агрегатов путём оценки эксплуатационных характеристик смазывающих материалов в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления, отличающиеся от известных учётом диэлектрической проницаемости среды между контактирующими поверхностями.

5. Расширены представления о применимости рабочих жидкостей и смазывающих материалов, используемых в высоконагруженных элементах металлургических агрегатов, позволяющие уточнять критические параметры функционирования машин с учётом специфики накопления продуктов износа и изменения геометрических параметров зон трения как в малых зазорах 2-100 мкм, так и в зазорах свыше 100 мкм.

6. С целью обеспечения безаварийной эксплуатации, разработан метод комплексного безразборного диагностирования элементов систем управления металлургических агрегатов, отличающийся учётом степени, вида износа и оценки остаточного ресурса и доказана его эффективность на примере быстродействующих золотниковых распределителей систем противоизгиба валков прокатного стана при токовой нагрузке менее 2 ампер с использованием импортозамещающего оборудования.

Теоретическая значимость обусловлена тем, что:

-создана модернизированная математическая модель движения жидких и газообразных сред, позволяющая повысить достоверность оценки состояния объектов при высоких параметрах нагружения и воздействий, характерных для элементов существующего и перспективного отечественного и зарубежного металлургического оборудования, путём введения корректирующих коэффициентов и параметров сред.

-разработана методика диагностирования, использующая модернизированную математическую модель, которая учитывает

температурные поля для оценки состояния теплогидравлических и механических элементов металлургических машин и агрегатов.

-теоретически доказано влияние граничных слоёв и окиси железа на характеристики рабочих жидкостей и смазок в условиях высоких контактных давлений и малых, менее 100 мкм, зазоров;

-разработана методика расчёта вероятного времени отказа, использующая регрессионные зависимости, корректируемые по результатам комплексной первичной диагностики элементов металлургического оборудования.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертации являются логические связи, последовательность проводимых исследований и диагностических мероприятий, а также процедуры математического моделирования. В исследовании применены методы имитационного моделирования и методы натурального и численного эксперимента с использованием следующего оборудования и программного обеспечения: токовый бесконтактный датчик ИС ACS712, самописец UT-71В, двухканальный генератор сигналов MHS-5200А, тепловизор SAT 6000, разработанная автором и запатентованная система оценки рабочих параметров сред, программных комплексах COSMOS Flo Works и Ansis, Chemcraft и UCSF Chimera.

Практическая значимость

1. Разработанные методики комплексной диагностики элементов металлургических машин позволили сократить время первичных диагностических мероприятий на 34-52% при повышении достоверности получаемых результатов на 15-20%.

2. Созданы диагностические комплексы, позволяющие испытывать рабочие жидкости и смазочные материалы в зоне критических нагрузок.

3. Результаты исследования позволили в условиях листопрокатного цеха № 1 АО «Уральская Сталь» уменьшить время аварийных простоев за счёт повышения эффективности первичной диагностики современного металлургического оборудования, включающего гидравлические, механические элементы с обеспечением единовременного экономического эффекта до 330 тысяч рублей.

4. Используя разработанный математический аппарат усовершенствована конструкция тупиковой горелки ванн горячего цинкования, позволившая увеличить стойкость ее тубы и рассекателя, выполненного из отечественного материала (карбида кремния), с 2500 часов непрерывной работы до 4300 часов безаварийной эксплуатации. Конструкция, методика настройки и диагностики внедрена в производство, что подтверждается актами.

5. Разработан, апробирован и защищен патентами на изобретения новый вариант конструкции диагностического оборудования для

определения характеристик рабочих сред и смазочных материалов, используемых в металлургических машинах, с предельным давлением функционирования до 500 МПа.

6. Разработаны, апробированы на металлургических предприятиях и защищены патентом на полезные модели системы бесконтактной диагностики механического, энергетического и гидравлического оборудования.

7. Полученные теоретические и экспериментальные результаты используются в учебном процессе кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и НОУ «МИТИ».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованные решения проблемы комплексной оценки остаточного ресурса элементов систем металлургических агрегатов с целью повышения точности прогнозов при проведении первичного безразборного диагностирования.

2. Методология первичного диагностирования элементов металлургических агрегатов с использованием тепловизионного контроля путём расчётной оценки объёмного распределения полей температур в целях обеспечения надежности и безопасной эксплуатации оборудования.

3. Математическая модель и методика ее использования для оценки гидравлических характеристик рабочих сред, смазывающих материалов и теплоносителей, используемых в системах металлургических агрегатов, позволяющие оценивать их параметры при предельных режимах эксплуатации с учетом физико-химических процессов, протекающих в этих средах при давлениях свыше 45 МПа.

4. Диагностическое определение предельных режимов эксплуатации металлургических машин и агрегатов путём оценки характеристик рабочих сред и смазочных материалов в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления до 200 МПа.

5. Методика безразборного распознавания вида отказов и оценки остаточного ресурса элементов систем управления металлургических агрегатов с золотниковыми парами.

6. Методика определения оптимальных геометрических параметров тупиковых горелок металлургических агрегатов, используемая при их проектировании, настройке и диагностике с целью обеспечения промышленной и экологической безопасности.

Степень достоверности и апробация результатов исследования обеспечивается использованием фундаментальных принципов механики сплошной среды для описания процессов тепломассообмена, современных

методов численного моделирования с использованием программных пакетов COSMOS Flo Works и Ansis, Chemcraft и UCSF Chimera, а также воспроизводимостью результатов в условиях металлургических предприятий.

Основные результаты работы докладывались на Всероссийских международных научно-практических конференциях преподавателей, ученых, специалистов и аспирантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 1997-2016 г.), Всероссийской конференции к 90-летию В.П. Макеева (Москва, 2014 г.), научно-практической конференции в научном центре РАН (г. Самара, 2013-2014, 2016 г.), на научно-технической конференции СГАУ им. С.П. Королева (Самара, 1998, 1999, 2012-2014, 2018 г.), Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) ЮУрГУ (Пром-Инжиниринг), «Безопасность критических инфраструктур и территорий» (Екатеринбург, 2011 г.), «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2017 г.), «Инновационные решения для повышения эффективности технического обслуживания и ремонтов агрегатов, оборудования предприятий металлургической промышленности» (Липецк, 2018 г.), «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Екатеринбург, 2018 г.), «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2018 (GloSIC)» (г. Челябинск, 2018 г.), на научно-практических конференциях преподавателей, ученых, специалистов и аспирантов МГТУ (г. Магнитогорск 2018 г.), на конференции «Технология машиностроения и материаловедение» (г. Новокузнецк, 2019 г.); материалы диссертации были доложены на межкафедральном семинаре «Технического университета УГМК» (г. Верхняя Пышма, 2016 г.), докладывались в ОмГТУ (Омск 2016 г.), были доложены на межкафедральном семинаре ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург 2019 г.), обсуждались на межкафедральном семинаре ТулГУ (г. Тула 2019 г.), докладывались на семинаре ПАО НЛМК (г. Липецк 2020 г.), докладывались на семинаре АО «ЧЦЗ» (г. Челябинск 2020 г.), докладывалась на кафедре «Машины и технологии обработки давлением» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 г.), обсуждались на межкафедральном семинаре СибГИУ (г. Новокузнецк 2020 г.), обсуждались на межкафедральном семинаре НИТУ «МИСиС» (г. Москва 2021 г.).

Личный вклад соискателя. Все приведенные в диссертации результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Публикации. По основным результатам исследования опубликовано 52 работы, из них 26 – в журналах, рекомендованных ВАК, 6 – в изданиях, индексируемых в Scopus, 2 монографии, 8 патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 281 наименований,

приложения и содержит 280 страницы текста, включая 130 рисунков и таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность рассматриваемых научно-технических проблем, научная и практическая значимость исследования, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, приведены основные сведения о методах исследований, апробации работы, степени достоверности и результатах исследования.

Первая глава содержит анализ проблем в области эксплуатации элементов металлургических машин. Рассмотрены базовые подходы, применяемые для обеспечения безаварийной эксплуатации машин, их достоинства и недостатки. Приведен анализ проблем, связанных с оценкой и обеспечением уровня надежности элементов металлургического оборудования.

Осознание необходимости улучшения обслуживания металлургического оборудования впервые излагалось в трудах видного Российского ученого Грум-Гржимайло В.Е. еще в конце 19-го века и получило дальнейшее развитие в трудах Попова Г.А., Спиридонова В.В., Борисова Ю.С., Якобсона М.О., Касаткина Н.Л., Столбова В.Ю., и др. Отказы механической части хорошо изучены в работах Зеленина А.Я., Махно Д.Е., Горбатьюка С.М., Русихина В.И., большой вклад в изучение износа гидравлического оборудования внесли: Башта Т.М., Алексеева Т.В., Антипов В.В., Барышев В.П., Алексеев Н.М., Михин Н.М., Артюх В.Г., Тененбаум М.М., Хрущев М.М., Бабичев М.А. и др.

Оценивая состояние оборудования в металлургической отрасли Российской Федерации, необходимо отметить значительное обновление производственного парка. Интенсивно внедряются новые технологические процессы, новое оборудование, спроектированное, а зачастую и изготовленное за пределами страны.

Как в нашей стране, так и за рубежом для снижения количества внезапных отказов и оптимизации закупок запасных частей используют как методики статистической обработки данных о предыдущих отказах оборудования, так и методы диагностики. Необходимо отметить, что использование различных методов диагностики даёт разную вероятность выявления дефектов оборудования. Наиболее сложной задачей является оценка остаточного ресурса оборудования. Анализируя параметры диагностики объектов, удаётся получить регрессионные зависимости для оценки остаточного ресурса. Большинство моделей этого типа были получены в период с 60-х до 90-х годов прошлого столетия. За прошедший

период значительно поменялись конструкции и технологии изготовления, как основного, так и в большей степени вспомогательного оборудования металлургических производств. Это требует, как разработки новых методов, так получения регрессионных зависимостей, учитывающих возникшие изменения.

Несмотря на огромный объем исследований, проведенных отечественными и за рубежом учеными, ряд вопросов, возникающих при эксплуатации металлургического оборудования, остается не полностью изученным. Недостаточно проработаны вопросы первичной диагностики высоконагруженных узлов металлургических агрегатов с применением тепловизионного оборудования. Наиболее перспективным методом является локализация выявляемых дефектов путём моделирования процессов, протекающих в агрегатах, используя в качестве граничных условий поверхностные температурные поля. Если решение задачи распространения тепла в конструкциях достаточно хорошо проработано, то сопряжённые задачи теплообмена в жидких и газообразных средах, существующие на сегодняшний день, учитывают далеко не все факторы, характерные как для существующего, так и перспективного металлургического оборудования. Так, можно констатировать слабую изученность процессов, протекающих в зонах граничных слоев смазок и металлических поверхностей при импульсном повышении давления. Не учитывается специфика теплогидравлических и механических систем металлургического оборудования, где основным внешним загрязнителем являются оксиды железа. Не менее важной задачей для производства является создание простых и надёжных методик и оборудования комплексной бесконтактной оценки состояния металлургических агрегатов с целью прогнозирования отказов.

Для решения указанных проблем на основе развития научного подхода к диагностике состояния объектов применительно к элементам металлургических агрегатов поставлены цели и задачи, описанные в общей характеристике работы.

Вторая глава посвящена развитию научных основ диагностики металлургического оборудования. Приводится анализ состояния вопросов диагностики металлургических систем. Приведён анализ применения методов диагностики механического, теплогенерирующего, гидравлического оборудования высоконагруженных металлургических машин и агрегатов и предложена методология первичного диагностирования. Для оценки времени наступления критического состояния элементов металлургического оборудования по информации о изменении функциональных параметров агрегатов определяем вид регрессионной зависимости (рисунок 1), значение

средне квадратичного отклонения 0.596, вероятность нахождения в интервале 0.995.

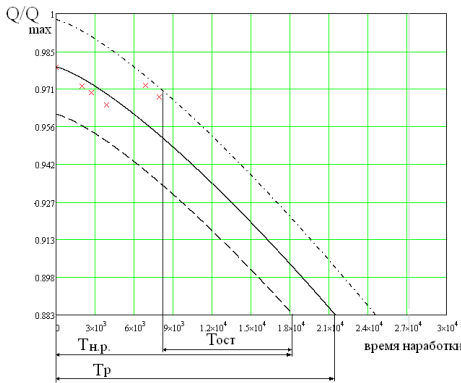


Рисунок 1 – Оценка остаточного ресурса агрегата: * – данные диагностики; – – расчетная кривая; T_p вероятное время отказа; $T_{нр}$ время безотказной работы; $T_{ост}$ время остаточного ресурса

изменения к каждому виду оборудования.

Данная процедура производится для каждого используемого метода диагностики с оценкой вероятного времени отказа. Использование различных методов диагностики определяется не только факторами вероятности выявления дефектов, но и временным и стоимостным фактором.

Достоверность качества диагностики элементов металлургического оборудования, а именно футеровки, теплогенерирующих установок, механических и гидравлических систем при снижении стоимости диагностических процедур даёт возможность применения комплексной диагностики с использованием в качестве методов предварительной диагностики оценки состояния оборудования на основе анализа термограмм внешних поверхностей агрегатов (рисунок 2).

Для решения этой задачи предложена методика оценки состояния объекта, позволяющая определять распределение тепловых полей. Для значительного количества элементов оборудования: опор скольжения, элементов теплозащиты горелок, корпусов насосов и др. бывает достаточно решения в цилиндрической системе координат. Система уравнений в этом случае может быть представлена в классическом варианте, при начальных и граничных условиях определяемых с учётом термограмм поверхности:

Особенностью этой схемы является коррекция параметров при каждом акте диагностики, что позволяет учитывать меняющиеся условия эксплуатации. Установленные закономерности износа систем определяются в виде:

$$x(t) = vt^\alpha + \Delta x_{сл} + \Delta x_n,$$

где x – значение параметра; v – скорость изменения параметра; α – показатель степени; t – наработка; $\Delta x_{сл}$ – случайная величина отклонения параметра; Δx_n – начальное значение параметра.

Параметр α определяется индивидуально по истории его

$$\begin{cases} (1-s)\rho_k c_k \frac{\partial t_k}{\partial \tau} = \alpha(T-t) + \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial t}{\partial R} \right) \\ (-s)u c_2 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_v(T-t) \end{cases} \quad (1)$$

где α_v – приведенный коэффициент теплоотдачи; s – параметр направления теплового потока; ρ_k и c_k – плотность и теплоемкость материала; λ_n – теплопроводность материала; c_2 – теплоемкость газа на границе; k – коэффициент теплоотдачи; R – текущий радиус; R_n – наружный радиус; H – высота; t – температура материала; u – скорость теплоносителя; t_0 – температура окружающей среды; T , T_2 – температура теплоносителя на границе; τ – время.



Рисунок 2 –Схема первичной диагностики

Решение задачи производится методом итераций. Если задача формулируется как задача определения остаточной толщины слоя теплоизоляции, то при известной интенсивности передачи тепла и известных условиях теплосъема производится расчет до определения температуры на наружной поверхности стенки. При отличии расчётного теплового поля от результатов тепловизионной диагностики объекта корректируется толщина теплоизоляции, и расчет повторяется до достижения требуемой точности. Для решения этой задачи использовали методы математического моделирования течения среды. Модернизированная математическая модель движения среды учитывала эффекты изменения вязкости при импульсном повышении давления и загрязнении оксидами железа в случае движения жидкой среды по каналам объекта. Что позволяет повысить точность определения параметров на 15-20% по сравнению с ранее известными моделями. Адекватность подхода определяется совпадением результатов диагностики с результатами анализа пост аварийных ситуаций на оборудовании Первоуральского новотрубного завода (ОАО «ПНТЗ»). Этого достаточно для оценки состояния металлургического оборудования, что подтверждено актами внедрения.

Третья глава посвящена вопросам моделирования гидравлических характеристик рабочих сред и процессов, протекающих в парах трения и малых зазорах в подвергающихся физико-химическому воздействию при давлениях в жидких средах свыше 50 МПа, характерных для высоконагруженных узлов систем противоизгиба валков современных прокатных станков. Структуру подхода отражает единая исходная концепция постановки задач и решения систем дифференциальных уравнений.

Для решения задачи моделирования движения жидкости в зазоре и оценки гидравлических характеристик течения применяли модернизированную автором модель Г.С. Глушко.

$$\rho \left(u_x \frac{\partial E}{\partial x} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_1 \mu_t) \frac{\partial E}{\partial y} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial E}{\partial y} \right)^2 - \frac{c_2 (\mu + c_1 \mu_t)}{L^2} E; \quad (2)$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial L}{\partial x} + u_y \frac{\partial L}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_3 \mu_t) \frac{\partial L}{\partial y} \right] - c_4 \frac{L}{E} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + Bc_5 \sqrt{E\rho} \left[1 - \frac{L}{(R-r)^2} \right] - \rho c_6 L \frac{\partial U}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = \alpha Re_t \left[1 - \exp(\delta_2 Re_t^2) + \delta_3 \sqrt{Re_t} \exp(\delta_1 Re_t^2) \right]; \quad (4)$$

$\alpha = 0,2$; $\delta_1 = 4 \cdot 10^{-4}$; $\delta_2 = 2,1 \cdot 10^{-4}$; $\delta_3 = 2 \cdot 10^{-2}$; $c_1 = 0,4$; $c_2 = 3,93$;
 $c_3 = 0,35$; $c_4 = 0,125$; $c_5 = 0,29$; $c_6 = 0,30$; $c_7 = 1,75$;

$$Re_t = \frac{\rho \sqrt{EL}}{\mu}; B = c_6 + \frac{c_7}{Re_t};$$

E – энергия турбулентности; τ – турбулентное трение; L – масштаб турбулентности; \mathcal{E} – скорости диссипации турбулентной энергии;

v_i – кинематический коэффициент вязкости турбулентной;
 μ_t – динамический коэффициент вязкости турбулентной.

В отличие от существующих моделей вязкость жидкой среды оценивали с учетом деформаций молекулярных цепей.

Моделирование и расчет деформаций молекулярных цепей производили в компьютерных программных пакетах Chemcraft и UCSF Chimera.

Характеристическая вязкость:

$$[\mu] = K_\eta M^{\alpha_\eta} \quad (5)$$

где K_η и α_η – константы, связывающие характеристическую вязкость с молекулярным весом M .

Выражающая отношение гидродинамических диффузионных и вязкостных радиусов макромолекул константа:

$$A = \mu_0 T^{-1} D (M [\mu_p])^{1/3} \quad (6)$$

μ_0 – вязкость растворителя, $A = 3,44 \cdot 10^{-10}$ эрг/град.

Вязкость раствора полидисперсного полимера учитываем как функцию от концентрации: $\mu_p = f(C)$.

Поэтому вязкость раствора полидисперсного полимера

$$[\mu_p] = \sum_i K_\eta M_i^{\alpha_\eta} C_i \quad (7)$$

Для оценки характеристик рабочих жидкостей и смазочных материалов в зазорах при исследовании электрохимических и релаксационных процессов использовали оценку диэлектрической проницаемости. Рассматривали также явление диэлектрической релаксации, которая для жидкостей считается пропорциональной вязкости:

$$\tau_{\partial\vartheta} = \frac{4\pi R^3}{kT} \mu = \frac{1}{2\pi\nu_{\tau_{\partial\vartheta}}} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_\infty}} \quad (8)$$

Где: R – радиус молекулы; k – постоянная Больцмана; ε – статическая диэлектрическая проницаемость; $\nu_{\tau_{\partial\vartheta}}$ – частота источника, которая

соответствует максимуму тангенса угла диэлектрических потерь жидкой среды; $\varepsilon'_{\infty} = 1,1n^2$ – неполярная составляющая диэлектрической проницаемости; n – показатель преломления среды.

Модель позволяет оценивать поведение рабочих сред в высоконагруженных элементах металлургического оборудования как в объемах при воздействии высоких давлений, вызывающих физико-химические процессы, так и в зазорах 2-100 мкм пар трения, за счёт учёта этих факторов при оценке вязкости рабочей среды, что подтверждается моделированием процессов на суперкомпьютере «торнадо» ЮУрГУ.

Четвертая глава посвящена решению задач разработки методик и аппаратуры диагностики элементов металлургического оборудования. На основании данных простых металлургического оборудования АО «Первоуральского новотрубного завода» (ПНТЗ г. Первоуральск), произведена оценка критичных зон первичной и углублённой диагностики современных промышленных агрегатов: высадочных прессов, прокатных станков, оборудования печей, систем испытаний продукции.

Апробирована разработанная система объёмного контроля температуры объекта по внешним тепловым полям. Разработан блок комплексной первичной диагностики, включающий вибрационно акустической модуль, универсальный модуль диагностики состояния рабочих сред, систему токового контроля.

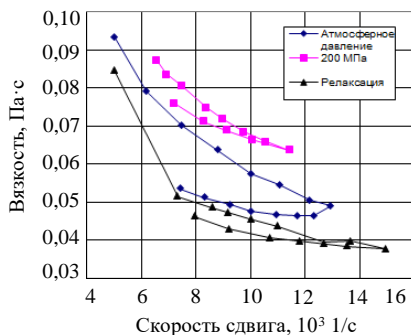
Созданы капиллярный (рисунок 3) и ротационный вискозиметры, системы контроля состояния и параметров исследуемых компонентов. В капиллярном вискозиметре, используя систему плунжеров мультипликаторов давлений, осуществлялось однократное движение исследуемой среды и по перепаду давлений оценивалась вязкость.

Ротационный вискозиметр оснащён измерительной ячейкой, использующей коаксиальные цилиндры. Применена система с подвижным внутренним цилиндром и неподвижным наружным.

Для привода вискозиметра применён бесколлекторный электродвигатель с питанием от постоянного тока с вынесенной системой контроля и задания оборотов. Двигатель интегрирован в измерительную ячейку, нагружаемую давлением. Контроль оборотов осуществляется по двум независимым каналам. Система допускает изменение частоты вращения от 0 до 7000 об/мин и соответствующее изменение скорости сдвига в исследуемой среде. По контролируемой мощности, потребляемой приводом, и скорости сдвига рассчитывалась вязкость исследуемой жидкости с коррекцией на изменение температуры.



а



б

Рисунок 3 а – Внешний вид капиллярного вискозиметра, б – полученные кривые вязкости масла Mitsubishi DiaQueen ATF SP3, температура 24 °С. Кривая «Релаксация» определена после резкого сброса давления с 200 МПа до атмосферного

На рисунке 4 представлена конструкция измерительной ячейки. Характеристики ротационного вискозиметра: исследуемые жидкости – не токопроводящие; диапазон определения вязкости – 0,005-0,100 Па·с; создаваемое избыточное давление исследуемой среды – 0,1...500 МПа; скорость сдвига – 5000-30000 с^{-1} ; температура – 15-25°С.

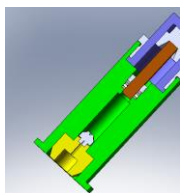
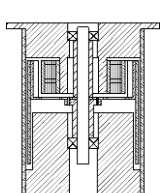


Рисунок 4 – Конструкция и внешний вид измерительной ячейки и блока повышения давления

В разработанных вискозиметрах давление в диапазоне от 20 до 500 МПа определяли с использованием манганиновых манометров. Контроль температуры осуществлялся по разработанной методике диагностики путём анализа внешних тепловых полей.

Для гидравлических систем современных металлургических машин и высоконагруженных опор скольжения были разработаны две установки, оценивающие характеристики жидкости в зазорах 2-100 мкм.

Установка контроля состояния комплекса: рабочая среда, гильза, золотник состоит из управляющих магнитов, пары гильза-золотник и датчика

положения; данная конструкция измерительного модуля в сборке помещается в мультипликатор высокого давления. Для определения мощностной характеристики в цепь силовых магнитов установлены токовый бесконтактный датчик ИС ACS712. По значению токового сигнала, напряжения на катушке и положения сердечника производили расчет вольтамперной характеристики, влияния зазора учитывали путем сравнения с эталонной характеристикой. Измерительный блок установки использовался как диагностический комплекс контроля электрогидравлических распределителей.

Вторая установка оценивает физико-химические параметры среды методом измерения диэлектрических потерь в зазоре. Сущность методики заключается в оценке пропорциональности вязкости по отношению к времени диэлектрической релаксации. Использован плоский конденсатор в качестве измерительной ячейки. Пластины электродов, выполненные из низколегированной стали, разделенные по периметру на 10% своей площади фторопластовой пленкой толщиной 10 микрон, и удерживаются в обоймах из фторопласта ф-4. Конденсатор (рисунок 5) помещали в полость, где создавали избыточное давление. Замеры осуществляли в диапазоне низких, до 800 Гц, частот. Удельная электрическая проводимость оценивалась как

$$\gamma = \varepsilon_0 \frac{c}{C_0}, \text{ где } \varepsilon_0 - \text{диэлектрическая проницаемость вакуума; } C_0 -$$

электрическая емкость незаполненного конденсатора.

Наличие критического возрастания вязкости определяется по оценке достижения ε' максимальных значений при частотах внешнего электрического поля порядка 10^3 Гц. Данная методика опробован на полярных жидкостях и обеспечил хорошие результаты, при наличии в неполярных средах полярных присадок метод также применим.

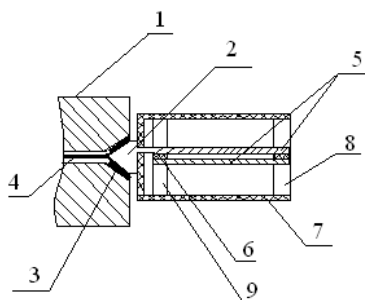


Рисунок 5 – Схема измерительной ячейки:
 1 – дно камеры высокого давления; 2 – токоввод; 3 – изолятор токоввода; 4 – измерительный кабель; 5 – пластины конденсатора; 6 – дистанционная прокладка; 7 – трубчатая направляющая; 8 и 9 – дистанционные полукольца

Для измерения электрической емкости конденсатора использовали классическую схему биений. Опорный генератор частоты генерировал в частоту ω_0 , ее сравнивали с частотой второго канала генератора, в колебательный контур которого попеременно подключали измерительный конденсатор C_x и контрольную калиброванную емкость. Использовали измеритель-самописец УТ-71В, двухканальный генератор сигналов МНС-5200А. Данные обрабатывали методом наименьших квадратов, калибровку производили по эталонным жидкостям – дистиллированной воде и бензолу, максимальная ошибка в исследуемом диапазоне давлений не превышала 4,2%. Методика оценки принадлежности данных к одной совокупности проводилась путем расчета критерия Стьюдента. Методика оценки химической стабильности рабочих жидкостей и смазывающих материалов применена на АО «Первоуральский новотрубный завод» для анализа выходов из стоя элементов силового гидропривода прошивного стана и подтверждена актом внедрения.

Пятая глава посвящена анализу численного моделирования и экспериментальных исследований элементов систем листового прокатного стана 2800 ЛПЦ №1 АО «Уральская Сталь» г. Новотроицк (рисунок 9,10). Важнейшим показателем качества листового проката является разнотолщинность. На этот параметр оказывают влияние такие факторы, как прогиб валков, тепловая деформация, износ рабочих поверхностей, состояние опор скольжения. Самым эффективным способом компенсировать эти факторы является на сегодняшний день гидромеханические устройства изгиба опорных и рабочих валков. В состав системы входят гидравлические цилиндры, управляемые системой быстродействующих дросселирующих золотниковых распределителей с частотой смены сигнала порядка 250 Гц.

Спецификой гидравлических систем металлургического оборудования является наличие в качестве внешнего загрязнителя частиц окислов железа, а также значительная длина подводящих магистралей, что создаёт ухудшенные условия для эксплуатации гидравлических приводов и способно значительно менять быстродействие системы. Оценивалось влияние на вязкость (рисунок 6) и, следовательно, на скорость перемещения золотников в гильзах распределителей элементов металлургического оборудования. Определялось влияние твердых загрязнителей и электромагнитного поля на кинематическую вязкость полимерных растворов с комплексом присадок, в том числе и обладающих магнитными свойствами. Для данной цели использовали раствор стиролакрилового полимера в керосине, с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:5. Кинематическая вязкость раствора стиролакрилового полимера в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:500 оказалась ниже

вязкости чистого керосина на 8,31%, а при внесении образца в переменное электромагнитное поле его вязкость возросла на 17,52% по сравнению с вязкостью вне электромагнитного поля. Влияния на вязкость загрязнителя на основе магнетита (Fe_3O_4) при размере частиц от 8 до 12 нм и отсутствии магнитного поля не выявлено. Результаты эксперимента доказали влияние загрязнителя на основе магнетита на изменение быстродействия системы противоизгиба валков прокатного стана листопркатного цеха №1 АО «Уральская Сталь» при размере частиц загрязнителя менее трети зазора в паре гильза – золотник. Для выявления причин периодических параметрических отказов электрогидравлических дросселирующих быстродействующих распределителей системы противоизгиба валков прокатного стана листопркатного цеха №1 АО «Уральская Сталь» была поставлена серия экспериментов, по оценке потери подвижности плунжерных пар. Исследования проводили на плунжерных парах установки НГР 2000 на чистом керосине КТ-1 ГОСТ 13032, эталонном дизтопливе ГОСТ Р 52368-2005 тип III при поддержании 7-го класса чистоты по NAS.

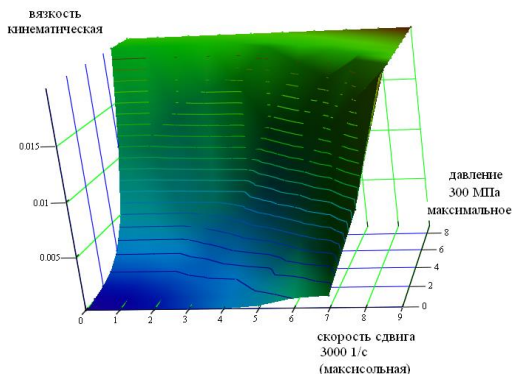


Рисунок 6 – Зависимости давление–скорость сдвига–вязкость для масла SHV 36

Вплоть до предельных давлений испытаний в 200 МПа схватывания поверхностей плунжерных пар не происходило. При исследовании товарного дизтоплива, соответствующего ГОСТ 305-82, наблюдали устойчивое «склеивание» плунжерных пар при давлениях 154-170 МПа только при наличии намагниченной плунжерной пары и внесении присадки на основе магнетита (Fe_3O_4) 0,001% от массы исследуемого среды. Иная ситуация выявилась при добавлении индустриального масла в исследуемые составы. При добавках масел М8, И-20 в концентрациях от 0,1 до 1,0% при давлениях

ниже 30 МПа схватывания не наблюдали ни в одной из исследуемых жидкостей при обеспечении заданной чистоты.

Керосин КТ-1 – наблюдали устойчивое схватывание плунжерных пар при давлении 140-160 МПа при наличии концентрации масла выше 0,1% от массы базовой жидкости. Исследования показали в что начальная зона схватывания контактирующих поверхностей оказалась на границе 135 МПа. Для подтверждения версии о физико-химических процессах в зазорах высоконагруженных опор скольжения и парах гильза–золотник гидроаппаратов металлургического оборудования была поставлена серия экспериментов по определению диэлектрической проницаемости. Замеры производили для индустриального масла И-30 при зазорах 1 мм и 10 мкм. Установлено изменение диэлектрической проницаемости в зазорах менее 10 мкм по сравнению с диэлектрической проницаемостью в зазорах свыше 1 мм в диапазонах давлений ниже 35 МПа для исследуемой жидкости, что соответствовало условиям возникновения «плавающего» дефекта гидравлической системы противоизгиба валков прокатного стана.

Эксперименты показали, что давление и время выдержки оказывают значительное влияние на диэлектрическую проницаемость в малом зазоре. Приведённые данные соответствуют времени выдержки 30 минут. Диапазоны давления, соответствующие возрастанию трения в зазоре, качественно совпадают с диапазоном давления, соответствующим изменению проницаемости.

Проведён численный эксперимент по имитации плавающей неисправности системы противоизгиба валков с применением модернизированной модели, а также программных комплексов COSMOS Flo Works и Ansis. Результаты расчетов, полученные в программном комплексе Ansis и его приложениях, приведены на рисунке 7.

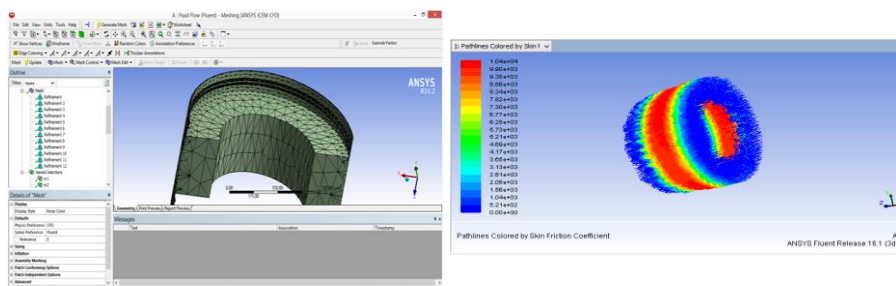


Рисунок 7 – Геометрия исследуемой модели и коэффициент поверхностного трения в зазоре

В качестве объекта моделирования была взята плунжерная пара с номинальным диаметром цилиндрической части золотника 25 мм, с зазором между гильзой и цилиндрической частью золотника 13 мкм и полной длиной гильзы 61,5 мм. Эти параметры соответствовали параметрам рабочих поясков пары гильза – золотник второй ступени сервоклапана системы противоизгиба валков прокатного стана АО «Уральская Сталь» листопркатный цех №1.

Результаты исследования показывают, что при математическом моделировании модифицированной моделью, в отличие от стандартных современных программных комплексов, можно производить расчет с допустимой для инженерных расчетов точностью в зоне высоких давлений, что позволяет моделировать процессы, характерные для элементов гидравлических систем металлургического оборудования с учётом тенденции к росту рабочих давлений.

В шестой главе на примере комплексной диагностики оборудования показано применение разработанных методик оценки состояния объектов. Методика комплексной первичной диагностики была успешно применена при обследовании оборудования в цехе №4 Первоуральского новотрубного завода (АО «ПНТЗ») и прокатного цеха Уральской стали (Новотроицк). По этой методике оценивали температурные поля с расчетом распределения температур в объеме наиболее ответственного оборудования, вибродиагностику, токовую диагностику, загрязнения и химическую стабильность рабочих сред (рисунки 8-12).

Наиболее эффективным при первичной диагностике (данные получены при проведении диагностических мероприятий по обследованию оборудования цеха №4 АО «ПНТЗ») оказался метод анализа термограмм. При вероятности выявления дефектов не менее 0.67 метод показал минимальную стоимость диагностики из рассмотренных. Вибродиагностические методы, имея большую вероятность выявления дефектов 0,72, требовали больших затрат времени при более высокой квалификации персонала, что увеличивало стоимость диагностики. Минимальное время надёжного предсказания аварийного состояния агрегатов продемонстрировали методы спектрометрического анализа рабочих жидкостей и смазочных материалов, при этом стоимость использования этого метода была максимальной. Применение системы ультразвукового контроля, методов контроля по характеру токового сигнала, метода эталонных сигналов дали промежуточные результаты. Высокую эффективность продемонстрировал комбинированный подход, когда по результатам предварительного тепловизионного контроля проводилось обследование методами токовой диагностики и виброакустическими методами, что проявилось при обследовании силовых гидроцилиндров

высадочного пресса. Дефекты, выявляемые тепловизионным методом, проверялись методами акустическими и стендовой диагностикой, это позволило избежать ложных диагнозов. Температурные поля гидравлического цилиндра, причем за зоной повреждения был выявлен горизонтальный тепловой след, что характерно для повреждения уплотнений поршня (контрольное вскрытие подтвердило предположение). Анализ термограмм группы насосов, фиксировал критическое повышение температуры насоса №1 на 7 °С при увеличенной усреднённой температуре силовых обмоток его электродвигателя (по сравнению с насосами №2 и 3). Данные свидетельствовали о значительной потере ресурса насоса и внутренних утечках, дальнейшее наблюдение показало отказ насоса №1 спустя 2100 часов. Метод комплексной диагностики позволил в динамике оценить степень износа гидравлической системы управления высадочного пресса и уменьшить время простоев, вызываемых отказами диагностируемого оборудования.

При проведении комплексного обследования стана 2800 листопрокатного цеха №1 АО «Уральская Сталь» была решена задача безразборной оценки состояния электрогидравлических распределителей с использованием токового и тепловизионного метода контроля, и расчётного метода, оценки остаточного ресурса электродвигателей рольгангов (рисунок 8), задача оценки состояния системы противоизгиба валков стана 2800 ЛПЦ №1 от параметров состояния рабочей среды в зазоре пары гильза зольник сервоклапана управления противоизгибом (рисунок 9).

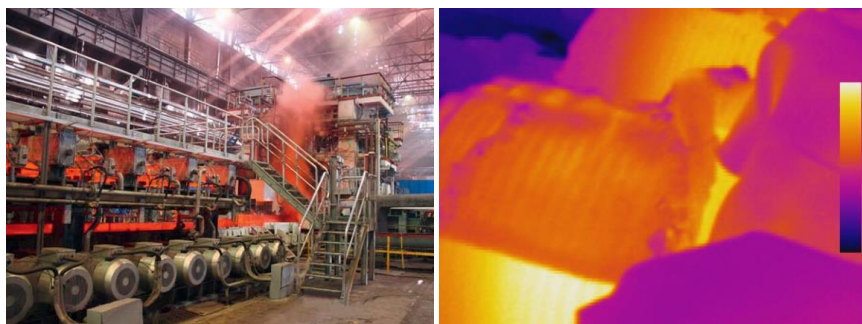


Рисунок 8 – Привода рольгангов ЛПЦ №1 АО «Уральская Сталь» и термограммы оценки состояния электродвигателей рольгангов при наличии дефекта

Используя метод анализа тепловых полей, полученных при тепловизионном контроле для оценки состояния гидравлических машин,

используемых в металлургии, автор получил хорошие результаты первичной диагностики, представленные на иллюстрациях (рисунки 10,11).



Рисунок 9 – Стан 2800 ЛПЦ№1 АО «Уральская Сталь», элемент гидросхемы управления противоизгибом и повреждённый золотник сервоклапана управления.

Предложенный метод комплексной диагностики позволил установить наличие ограничений по предельному быстродействию системы противоизгиба валков стана, связанную с состоянием пары гильза - золотник системы управления. Получены зависимости степени потери быстродействия системы противоизгиба от внешних тепловых полей и диаграммы Боде сервоклапана. Предложенные мероприятия позволили снизить процент брака по разнотолщинности проката.

Разработанная методика была успешно применена для выявления зон ухудшенного теплообмена системы охлаждения щек самоспекающихся электродов печей Челябинского цинкового завода, а также при выявлении дефектов воздухопроводов горелочных устройств ЭНТЕРНО (ЧТПЗ). Разработанные системы анализа рабочих жидкостей и смазочных материалов позволили выявить причину отказов гидросистем высадочного пресса цеха №4 АО «ПНТЗ», вызванную химической реакцией пакета присадок (рисунок 12) и оценить последствия смешивания масел различных производителей.

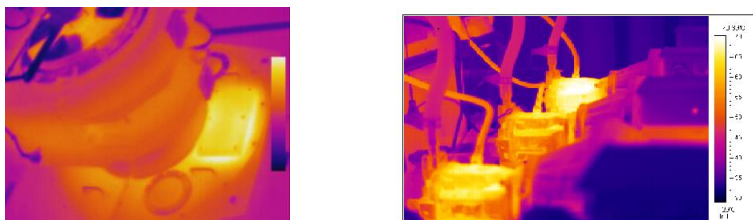


Рисунок 10 – Температурные поля опоры вала прокатного стана и группы насосов

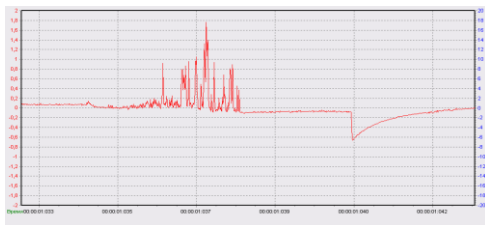
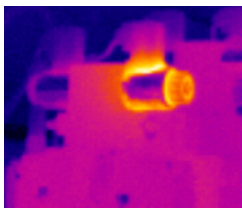


Рисунок 11 – Термограмма и токовый сигнал с электромагнита распределителя при интенсивном абразивном износе

Методы математического моделирования течения жидкости в зазорах использовались при анализе отказов пропорциональных распределителей систем управления процессом горячего цинкования и позволили выработать рекомендации по подбору оптимального теплового режима. В результате использования выполненных в диссертационной работе исследований в течение 2003-2017 гг. обеспечено увеличение ресурса агрегатов на 15-42% и снижение брака процесса горячего цинкования.

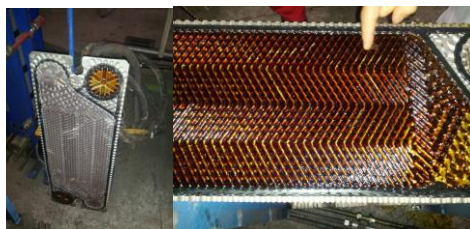


Рисунок 12 – Выпадение присадок

В период с 2003 по 2017 годы проводились работы с ПАО «Северский Трубный Завод», связанные с диагностикой элементов гидропривода, насосного оборудования. Методами комплексной диагностики оценивалось состояние объёмных и центробежных насосов и вспомогательного оборудования. Кроме того, используя возможности применения предложенной математической модели для газодинамических расчётов, удалось смоделировать процессы, спроектировать и определить оптимальные геометрические параметры и настройки тупиковых горелок ванны цинкования (рисунок 13). В результате проведённых работ установлено, что причиной отказов является локальный перегрев конструкции вследствие нарушения режима теплообмена. Это вызывало как прогары горелочных устройств, так и растрескивание раскателей.

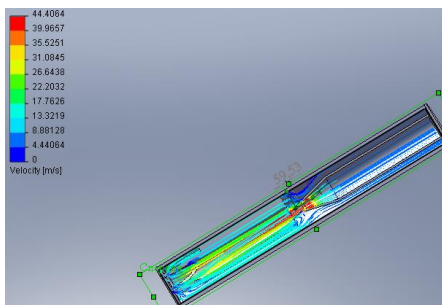


Рисунок 13 – Рассекатель и поля скоростей рабочей среды тупиковой горелки

Методами моделирования процесса функционирования с контролем внешних тепловых полей установлено:

- повышение эффективности передачи тепла возможно за счет увеличения вторичной циркуляции рабочей среды со скоростями не ниже 4,5 м/с для рассмотренной конструкции;
- увеличение коэффициента эжекции приводит к уменьшению температуры отводимых газов на 180-192 °С, что обеспечивает увеличение передаваемого теплового потока на 7-10% при более равномерном тепловом поле трубы и рассекателя и позволяет избежать локальных перегревов;
- для устранения причин возникновения отказов предложена методика определения зазора между срезом горелочного устройства и торцом рассекателя, позволяющая методом моделирования процесса обеспечить максимальный коэффициент эжекции и максимальный тепловой поток.

Для контроля режима работы предложен и реализован метод контроля наружных тепловых полей с последующей корректировкой режимных параметров горелочных устройств. Предложенный метод реализован фирмой АТИС при реконструкции ванн горячего цинкования.

В ходе совместной работы с Шеркуновым В.Г., Власовым А.Е., Тезе П. и сотрудниками фирмы «SMS Cheltec» по выявлению причин разнотвёрдости никель-кобальтового покрытия при изготовлении кристаллизаторов МНЛЗ был применён метод анализа внешних тепловых полей с последующим моделированием гидродинамических течений в ванне электролита. Применённый вариант модернизации позволил увеличить срок работы

кристаллизатора МНЛЗ за счёт снижения проявление эффекта разнотвёрдости защитного покрытия на 55%.

Основные выводы и результаты исследования

В диссертации на основании выполненных исследований безразборного диагностирования металлургического оборудования, дано решение важной научно-практической проблемы, позволившей повысить эффективность прогнозирования остаточного ресурса агрегатов с целью обеспечения надежности, безопасной эксплуатации и уменьшения стоимости обслуживания машин и агрегатов, что вносит существенный вклад в развитие экономики металлургической отрасли страны.

1. Получены научно обоснованные решения задачи комплексной оценки остаточного ресурса элементов систем металлургических агрегатов с целью повышения точности прогнозов при проведении первичного безразборного диагностирования. Разработанные методики комплексного диагностирования элементов металлургических машин позволили сократить время первичных диагностических мероприятий на 34-52% при повышении достоверности получаемых результатов, что обеспечило разовый экономический эффект при обследовании оборудования цеха прокатки АО Уральской Стали в 330 тыс. рублей.

2. Разработана методика оценки объемного распределения полей температур в элементах металлургических агрегатов с использованием тепловизионного контроля, позволяющая повысить эффективность первичного диагностирования в целях обеспечения надежности и безопасной эксплуатации металлургического оборудования. Доказана эффективность методологии при анализе состояния металлургического оборудования, теплозащиты, элементов с внутренними источниками тепла, что позволило выявить локализацию зоны внутренних дефектов. Использование методики определения температур элементов металлургического оборудования по фиксации отображения наружных тепловых полей позволило сократить время предварительного поиска неисправностей и положительно зарекомендовало себя для оценки остаточного ресурса с устойчивым предсказанием времени отказа за 2-3 месяца до наступления критического состояния, что снижает издержки на выявление неисправностей металлургических агрегатов.

3. Разработана математическая модель и решена задача ее использования для повышения достоверности прогнозов состояния систем металлургических агрегатов отличающиеся методом оценки гидравлических характеристик рабочих сред, смазывающих материалов и теплоносителей,

используемых в системах и позволяющая оценивать их характеристики при предельных режимах эксплуатации с учетом физико-химических процессов, протекающих в этих средах при давлениях свыше 150 МПа.

4. Разработана методика и технические решения реализации, позволяющая определять предельные режимы эксплуатации металлургических машин и агрегатов путём оценки характеристик рабочих жидкостей и смазочных материалов по контролю диэлектрической проницаемости в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления до 200 МПа. Разработано диагностическое оборудование и методики определения характеристик углеводородов. Расширены представления о применимости рабочих жидкостей и систем смазывания, используемых в высоконагруженных элементах металлургических агрегатов, позволяющие уточнять критические параметры функционирования существующих и перспективных машин с учётом специфики накопления продуктов износа и изменения геометрических параметров зон трения.

5. Разработан метод безразборного распознавания вида отказов и оценки остаточного ресурса на примере быстродействующих золотниковых распределителей систем управления противоизгиба валков прокатного стана при токовой нагрузке магнитной системы до 2 ампер, с целью обеспечения безаварийной эксплуатации. Созданное оборудование диагностики по программе импортозамещения имеет стоимость в 26 раз более низкую, чем зарубежные аналоги при более широком функционале возможностей.

6. Разработана методика определения оптимальных геометрических параметров тупиковых горелок металлургических агрегатов, применимая при их проектировании и настройке с целью обеспечения промышленной и экологической безопасности. Применение методики позволило увеличить стойкость тубы и раскатателя горелки, выполненного из отечественного материала, с 3,5 месяцев непрерывной работы до 6 месяцев безаварийной эксплуатации. Методика внедрена в производство.

7. Полученные теоретические и экспериментальные результаты обеспечили суммарный экономический эффект 20873 тыс. руб. Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», а также НОУ «МИТИ».

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Редников, С.Н. Использование комплексного подхода при первичной диагностике металлургического оборудования / С.Н. Редников // Наука и бизнес: пути развития. - 2022. - №2(128). - С. 55-58.
2. Редников, С.Н. Тенденции развития подходов к диагностированию металлургического оборудования в рамках концепции индустрии 4.0. / С.Н. Редников // Современные наукоемкие технологии- 2022. -№ 3. - С. 80-85.
3. Редников, С.Н. Роль первичного диагностирования металлургических агрегатов в обеспечении эффективной эксплуатации на производстве / С.Н. Редников // Современные наукоемкие технологии- 2021. - № 10. - С. 83-87.
4. Редников, С.Н. Использование комбинированных методов диагностики гидравлических систем металлургических агрегатов / С.Н. Редников // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2017. – №4. – С. 94-98.
5. Редников, С.Н. Использование комплексного подхода в диагностике гидравлических систем металлургического оборудования/ С.Н. Редников, Д.М. Закиров, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова // Наука и бизнес: пути развития. - 2018. - №10(88). - С. 8-11.
6. Закиров, Д.М. Методика оценки состояния оболочек установок обработки металлов гидростатическим давлением / Д.М. Закиров, С.Н. Редников, С.И. Платов, Н.Н. Огарков // Перспективы Науки. - 2018. - №10(109). -С. 96-100.
7. Редников, С.Н. Особенности моделирования и регулировки горелок металлургических агрегатов / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова // Тяжёлое Машиностроение. - 2018. - №10. - С. 18-19.
8. Редников, С.Н. Методика оценки режимов работы насосов в системах охлаждения металлургических агрегатов / С.Н. Редников, Х.А. Караашев // Тяжёлое Машиностроение. - 2018. -№10. - С. 20-24.
9. Редников, С.Н. Использование токовых методов контроля состояния элементов приводов металлургических агрегатов / С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова // Наука и бизнес: пути развития. - 2018. - №11(89). - С. 19-23.
10. Редников, С.Н. Анализ использования тепловизионных методов диагностики металлургического оборудования / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, С.И. Платов, Н.Н. Огарков // Перспективы Науки. - 2018. №11(110). - С. 14-18.
11. Редников, С.Н. Комбинированный метод диагностики элементов систем охлаждения металлургических агрегатов / С.Н. Редников, Х.А. Караашев //Естественные и технические науки. - 2018. - №11(125). - С. 288-291.

12. Редников, С.Н. Особенности модернизации систем аварийной защиты узлов разлива жидкого металла / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, Е.Н. Ахмедьянова // Естественные и технические науки. - 2018. - №11(125). - С. 296-297.
13. Редников, С.Н. Предсказание релаксационных эффектов в рабочих средах углеводородного состава при высоких давлениях / С.Н. Редников, К.В. Найгерт, Л.А. Прокудина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2018. - Т. 18. - № 1. – С. 24-33.
14. Редников, С.Н. Методика расчета адсорбционных процессов в малых зазорах проточной части приводов высокого давления / С.Н. Редников, К.В. Найгерт, Л.А. Прокудина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2017. - Т. 17. - №1. - С. 21-32.
15. Найгерт, К.В. Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2016. – Т. 16. - №2. - С. 52-60.
16. Шеркунов, В.Г. Влияние динамики движения электролита в гальванической ванне на однородность наносимого покрытия / В.Г. Шеркунов, С.Н. Редников, А.Е. Власов, П. Тезе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2016. - Т. 14. - №3. - С. 32-38.
17. Шеркунов, В.Г. Математическое моделирование процессов нанесения гальванических покрытий при различных скоростных режимах / В.Г. Шеркунов, С.Н. Редников, А.Е. Власов, П. Тезе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2016. - Т.14.- №2. - С. 101-106.
18. Редников, С.Н. Автоматизация рабочего процесса магнито-реологического дросселирующего устройства / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2016. - Т.14. - №2. - С. 23-32.
19. Редников, С.Н. Фазовые переходы в системах углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Известия Самарского научного центра российской академии наук. - 2014. - Т.16. - №1-2. - С. 515- 517.
20. Редников, С.Н. Математическое моделирование реологических характеристик углеводородов при воздействии высоких давлений / С.Н. Редников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. -2013. - Т. 15.- №4-2. - С. 402-404.
21. Редников, С.Н. Математическое описание теплогидравлических и химических свойств рабочих жидкостей гидроприводов высокого давления/

- С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Известия Самарского научного центра российской академии наук. - 2013. - Т. 15. -№4-2. - С. 571-574.
22. Редников, С.Н. Влияние высокого давления и релаксационных процессов на вязкостные характеристики углеводородов / С.Н. Редников, Д.А. Хламов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2013. - С. 102-106.
23. Редников, С.Н. Методы исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С.Н. Редников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2012. -Т.14. - №1(2). - С. 332-334.
24. Редников, С.Н. Оборудование для исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С.Н. Редников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3-1 (34). - С. 157-161.
25. Редников, С.Н. Определение температуры исследуемой среды при высоких давлениях / С.Н. Редников, Н.Н. Муромцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011.- Т. 13.- №1-3. -С. 620-622.
26. Редников, С.Н. Разработка ротационного вискозиметра высоких давлений для исследования свойств неньютоновских жидкостей / С.Н. Редников, И.Н. Султанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Машиностроение. - 2011. - №11. (228). - С. 38-42.

Публикации, входящие в международную базу данных Scopus

27. Rednikov, S. Integrated Diagnostic Method Analysis of Use in the Inspection of Rolling Mills / S. Rednikov, E. Akhmedyanova, K. Akhmedyanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. 969(1). 012077
28. Rednikov, S. Effective diagnostics of metallurgical equipment / S. Rednikov, E. Akhmedyanova, K. Akhmedyanova, D. Toymurzin // Proceedings – 2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2020. – 2020. - P. 151–156. 9267858
29. Rednikov, S. Diagnostics of drying units with microwave emitter units / S. Rednikov, E. Akhmedyanova // Proceedings– 2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2020. – 2020. - P. 157–162. 9267838
30. Rednikov, S. N. Experience in Using Combined Diagnostic Systems for Assessing State of Metallurgical Equipment / S. N. Rednikov, E. N. Akhmedyanova, D. M. Zakirov // Proceedings – 2018. Global Smart Industry Conference (GloSIC). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8570148>
31. Rednikov, S. N. Viscosity characteristics of hydrocarbons at high pressures / S. N. Rednikov // Procedia Engineering. - 2015. - Т. 129. - P. 839-844.

32. Rednikov, S. N. Comprehensive Diagnostics of the State of Metallurgical Equipment/Rednikov, S.N., Akhmedyanova, E.N., Zakirov, D.M.// Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. – 2021. - P. 1205–1211.

Монографии

33. Редников, С.Н. Комплексная диагностика металлургического оборудования: Монография / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Е.Н. Ахмедьянова - Магнитогорск: МГТУ, 2018. -75 с.

34. Редников, С.Н. Глава 9. Реологические аномалии в магнитореологических системах высокого давления / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Монография «Наука и технологии» Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Москва: РАН, 2014. – С. 194 – 220.

Патенты на изобретения и патенты на полезные модели

35. Пат. 2620332 РФ, МПК G01N 11/14. Ротационный вискозиметр / С.Н. Редников // БИПМ. 2017. Бюл. №13.

36. Пат. 2634163 РФ, МПК F15B 13/043. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // БИПМ. 2017. Бюл. №30.

37. Пат. 2634166 РФ, МПК F15B 21/06. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // БИПМ. 2017. Бюл. №30.

38. Пат. 2624082 РФ, МПК F17D 1/14. Модульная система электромагнитной транспортировки жидкостей, обладающих магнитными свойствами / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // БИПМ. 2017. Бюл. №19.

39. Пат. 127222 РФ, МПК G09B 9/00. Двухсторонний учебно-диагностический модуль для обучения персонала промышленных предприятий / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. Бюл. №11.

40. Пат. 127950 РФ, МПК G02B 21/00. Учебно-демонстрационная система для визуализации процессов микромира / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. Бюл. №13.

41. Пат. 131527 РФ, МПК G09B 9/00. Гидравлическая монтажная плита / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. Бюл. №23.

42. Пат. 127906 РФ, МПК G01N 1/00. Устройство для диагностики неисправностей технического оборудования / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. Бюл. №13.

Другие работы

43. Найгерт, К.В. Процессы полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар / К.В. Найгерт, С.Н. Редников, Н.М. Япарова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. - 2016. - №46. - С. 172-190.
44. Редников, С.Н. Зависимость внутренней энергии однокомпонентной углеводородной системы от размера частиц при снятии вязкостной характеристики в ротационном вискозиметре высокого давления/ С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. - 2014. - №36. - С. 143-154.
45. Редников, С.Н. Вязкостные характеристики углеводородов в области высоких давлений/ С.Н. Редников // Пром-Инжиниринг. труды международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). Челябинск. - 2015. - С. 22-24.
46. Редников, С.Н. Некоторые ошибки при решении задачи теплопроводности с подвижной границей раздела фаз / С.Н. Редников // Математическое моделирование и краевые задачи: труды тринадцатой межвузовской конференции: сб. Самара. СГТУ. - 2003. - С. 106-108.
47. Редников, С.Н. Релаксационные эффекты в углеводородах после нагружения гидростатическим давлением / С.Н. Редников, Р.И. Булгакова // Достижения науки - агропромышленному производству. Материалы ЛIII международной научно-технической конференции: сб. Челябинск. - 2014. - С. 50-54.
48. Редников, С.Н. Методы исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. - 2012. –Т. 3. - С. 49-54.
49. Rednikov, S. The Dynamics of Hydraulic Actuators with Adaptive Magnetorheological Semiconductor Control Devices / S. Rednikov, K. Naigert, D. Khabarova // International Journal of Fluid Power Engineering, Vol.21, Issue.1 - Recent Science. - 2015. - P. 1159-1166.
50. Редников, С.Н. Оценка состояния золотниковой пары электрогидравлических распределителей по характеру токового сигнала/ С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова // Электротехнические комплексы и системы Материалы международной научно-практической конференции: сб. в 2-х томах. Уфа. - 2017. - С. 93-96.
51. Редников, С.Н. Комплексный подход к первичной диагностике металлургических машин/ С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова // Технология машиностроения и материаловедение материалы

международной научно-практической конференции: сб. Новокузнецк. -2019.- С. 88-90.

52. Редников, С.Н. Эффективность диагностики металлургического оборудования/ С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова, Д.А. Таймурзин // Приборы. - 2021. - № 3 (249). - С. 24-30.