

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Г.И. НОСОВА

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

доктора технических наук

научный консультант –
доктор технических наук, профессор
Закиров Дильфат Минияхметович

Магнитогорск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1 Современное состояние научно-практических проблем в области эксплуатации и диагностики машин, агрегатов и процессов металлургии	14
1.1. Степень разработанности вопросов оценки состояния металлургических комплексов	14
1.2. Критический анализ современных подходов к диагностированию элементов металлургического оборудования	27
1.3. Анализ диагностики и отказов теплозащиты элементов металлургического оборудования	33
1.4. Особенности отказов систем разливки жидкого металла	37
1.5. Особенности диагностирования элементов систем охлаждения металлургических машин	41
1.6. Проблемы оценки состояния существующего теплогенерирующего оборудования металлургических комплексов на примере тупиковых горелок	47
1.7. Анализ диагностирования гидравлических систем силовых приводов металлургических агрегатов	49
1.8. Анализ подходов к моделированию теплогидравлических процессов в высоконагруженных системах металлургических машин	57
1.9. Выводы по главе 1 и постановка задач исследования	69
Глава 2 Развитие научных основ диагностирования металлургического оборудования	71
2.1. Развитие методики оценки износа оборудования	73
2.2. Совершенствование методики диагностики металлургического оборудования на основе оценки температурных полей систем в	80

	условиях эксплуатации	
2.3	Эффективность использования разработанных методов комплексной диагностики в металлургии	86
2.4	Выводы по главе 2	94
Глава 3	Математическое моделирование состояния рабочих сред в зазорах высоконагруженных систем металлургического оборудования	95
3.1	Обоснование и выбор исходных положений. Методика математического моделирования теплогидравлических характеристик рабочих сред высоконагруженных агрегатов	95
3.2	Моделирование физико-химических процессов в высоконагруженных узлах оборудования	105
3.3	Математическое описание оценки объемной вязкости рабочих жидкостей	113
3.4	Моделирование электрохимических процессов в граничных слоях щелевых каналов высоконагруженного оборудования	128
3.5	Выводы по главе 3	136
Глава 4	Разработка диагностических комплексов контроля состояния гидравлических систем металлургических агрегатов и рабочих сред в условиях нагружения высоким давлением	137
4.1	Разработка системы контроля внутренних температурных полей оборудования по внешним температурным полям	142
4.2	Разработка системы виброакустического контроля	150
4.3	Модернизация системы контроля давления	154
4.4	Практическое применение разработанной системы автоматической регистрации параметров экспериментального оборудования	157
4.5	Созданные системы диагностики гидравлических характеристик рабочих сред высоконагруженных узлов металлургических машин	161
4.5.1	Разработка конструкции капиллярного вискозиметра для определения вязкости рабочих сред в диапазоне от 10 до 1000 сСт при давлениях до 200МПа	162

4.5.2	Разработка новой конструкции ротационного вискозиметра для определения вязкостных характеристик углеводородов при давлениях до 200 МПа	166
4.5.3	Разработанная система контроля состояния жидкости в щелевых каналах высоконагруженных узлов металлургического оборудования	170
4.5.4	Усовершенствованная система контроля физико-химического состояния рабочих сред в зазорах при объёмном нагружении высоким давлением	177
4.6	Выводы по главе 4	182
Глава 5	Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований рабочих сред в высоконагруженных элементах металлургического оборудования	184
5.1	Гидравлические характеристики рабочих сред при давлениях до 200 МПа	186
5.2	Анализ влияния загрязненности рабочих сред	193
5.3	Исследование поведения жидких углеводородов в зазоре с целью прогнозирования параметров состояния оборудования	196
5.4	Анализ результатов математического моделирования с использованием модернизированной модели течения жидкости золотниковой пары сервоклапана системы противоизгиба валков прокатного стана	200
5.5	Выводы по главе 5	204
Глава 6	Применение теоретических и прикладных положений разработанных в диссертации для диагностирования оборудования на предприятиях металлургии.	206
6.1	Комплексная диагностика гидравлического прессы высадки концов труб производства SMS Meer	207 217
6.2	Оценка состояния оборудования прокатного стана 2800	224
6.3	Оценка технического состояния оборудования ванн горячего цинкования.	

6.4	Модернизация системы нанесения защитного никель кобальтового покрытия кристаллизаторов МНЛЗ	229 230
6.5	Выводы по главе 6	
	Основные выводы и результаты исследования	231
	Список литературы	234
	Приложение	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Повышение эксплуатационной надёжности агрегатов и узлов металлургических машин – научно практическая 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.

В разработку теории надёжности и диагностики машин значительный вклад внесли 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. Интенсивные 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., Ахматого 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 температурных 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 температурных 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 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 тяжело нагруженных 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 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, отличающийся 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 натурного и численного эксперимента с использованием следующего оборудования и программного обеспечения: токовый бесконтактный датчик ИС ACS712, самописец UT-71B, двухканальный генератор сигналов MHS-5200A, тепловизор SAT 6000, разработанная автором и запатентованная система оценки рабочих параметров сред, программных комплексах COSMOSFloWorks и Ansis, Chemcraft и UCSF Chimera.

Практическое значение полученных результатов

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. 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 объемного 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 150 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 теплообмена, современных методов численного моделирования с использованием программных пакетов COSMOSFloWorks и Ansys, 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 гг.), Всероссийской конференции к 90-летию В.П. Макеева (Москва, 2014 г.), научно-практической конференции в научном центре РАН (г. Самара, 2013-2014, 2016 гг.), на научно-технической конференции СГАУ им. С.П.Королева (Самара, 1998, 1999, 2012-2014, 2018 гг.), 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), на конференции «Технология машиностроения и материаловедение» (г. Новокузнецк, 2019); материалы диссертации были доложены на межкафедральном семинаре «Технического университета УГМК» (г. Верхняя Пышма, 2016), докладывались в ОмГТУ (Омск 2016), были доложены на межкафедральном семинаре ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург 2019), обсуждались на межкафедральном семинаре ТулГУ (г. Тула 2019), докладывались на семинаре ПАО НЛМК (г. Липецк 2020), докладывались на семинаре АО «ЧЦЗ» (г. Челябинск 2020), докладывалась на кафедре «Машины и технологии обработки давлением» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск 2017,2018,2019,2020,2021г.), обсуждались на межкафедральном семинаре СибГИУ (г. Новокузнецк 2020), обсуждались на межкафедральном семинаре НИТУ «МИСиС» (г. Москва 2021).

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.

Глава 1 Современное состояние научно-практических проблем в области эксплуатации и диагностики машин, агрегатов и процессов металлургии .

1.1. Диагностирование как метод снижения затрат на эксплуатацию металлургических машин и агрегатов

Металлургия – одна из отраслей промышленности, в которой вопросы надежности и качества управления традиционно имеют ключевое значение при решении задач повышения эффективности производства и обеспечения конкурентоспособности продукции. Класс металлургических машин, охватывающих в значительном количестве разнообразное технологическое оборудование, имеет свои особенности. Для металлургических агрегатов характерны:

- значительная (до нескольких сотен метров) протяженность технологических цепочек, используемых в общем производственном процессе;
- большой разброс технологических характеристик оборудования: к примеру, скорости рабочих органов от нескольких миллиметров до нескольких десятков метров в секунду, пиковые мощности отдельных агрегатов до нескольких тысяч киловатт, развиваемые усилия до нескольких десятков МН;
- высокие требования по обеспечению точности контролируемых параметров;
- экстремальные условия работы (пульсационные нагрузки, вибрация, агрессивность и загрязненность окружающей среды, значительные тепловые потоки, длительный или непрерывный режим работы оборудования при его загрузке на 100%);
- предъявляемые жесткие требования по надежности и безотказности работы оборудования.

Создавая современные технологические агрегаты, конструкторы стремятся увеличивать единичную мощность машин, снижая при этом затраты на производство единицы продукции, так в соответствии с техническим заданием на

технологическое направление в рамках Постановления Правительства РФ № 1312 [1] для высоконагруженных узлов оборудования устанавливается диапазон давлений до 250 МПа. Но рост удельных показателей зачастую приводит к созданию изделий с предельными характеристиками, и незначительное изменение рабочих параметров увеличивает число отказов оборудования, а значит, простой оборудования и снижает эффективность производства. Так, увеличенная мощность тепловыделения уменьшает стойкость нижней части футеровки стен, а увеличение давления в гидравлических системах управления приводит к сокращению их ресурса и требует улучшения качества очистки рабочей жидкости. Использование даже самых передовых технологий зачастую не гарантирует само по себе повышение эффективности производства и снижение аварийности (таблица 1.1). Значительно увеличить эффективность можно грамотной организацией эксплуатации систем и применением оптимальной системы ремонтнообслуживания металлургического производства. Это вызовет снижение не только издержек вследствие уменьшения простоев оборудования, но и стоимости жизненного цикла современных металлургических машин при сохранении уровня надежности.

Металлургическое производство интенсивно развивается и модернизируется. Основным направлением модернизации является снижение издержек производства и уменьшение нагрузки на окружающую среду. Во многом это удается достичь благодаря использованию современных металлургических комплексов, оснащенных дуговыми сталеплавильными печами, «печь-ковшом», вакууматором и машинами непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Быстрое развитие этого направления обусловлено меньшими затратами на производство единицы продукции при использовании этой технологии. Применение технологии непрерывной разливки позволяет исключить парк изложниц и вспомогательное оборудование их подготовки и обслуживания, заготовительные станки, а также сократить коммуникации, снизить энергопотребление. В то же время применение технологии непрерывной разливки стали дает возможность улучшить прочностные характеристики материала на 15-18% с одновременным повышением выхода годного продукта на 20%, ликвация

серы и фосфора может быть снижена в 1,5-2,0 раза по сравнению с классической технологией. Не менее революционным является процесс производства горячекатаной полосы с использованием технологии прямого восстановления железа. По сравнению с технологическим процессом этот подход в совокупности с выплавкой стали в электродуговых печах и получением готового продукта на МНЛЗ позволяет не только повысить энергоэффективность процесса, но и значительно снизить выброс вредных веществ в атмосферу.

Совершенствование металлургического оборудования требовало снижения издержек на эксплуатацию, ремонт и контроль состояния агрегатов. Первоначально эта задача решалась чисто органолептическими методами, качество диагностики определялось качеством подготовки специалистов, способных по оценке температуры, вибрации, шумам механизмов определять состояние и остаточный ресурс объекта. Формализация комплексной оценки не использовалась.

Таблица 1.1 – Аварии на предприятиях России и их причины		
Год и место аварии	Описание инцидента	Причина
28.04.2004, Нижнетагильский металлургический комбинат	В конвертерном цехе НТМК на машине непрерывного литья заготовок №2 произошло падение ковша с жидким металлом с поворотного стэнда МНЛЗ, что привело к возгоранию на нулевой отметке цеха. Погибло 2 человека[2].	Недостаток конструкторской документации и некачественное изготовление несущей конструкции. Комиссия установила дефекты узла крепления, а именно: непровар корня шва и внутренних швов на сварных кромках, а также дефекты крепления опорной стойки траверсы к поворотному столу МЛНЗ №2 (из 36 болтов крепления 9 имели механические повреждения, 3 болта не имели гаек).
28.02.2001. ОАО «Северсталь», г. Череповец	Авария на шахтной печи фирмы «ФУКС Системтехник». Пострадал 1 человек[2].	Комиссия установила, что после слива чугуна и отработки 9 МВт электроэнергии произошел хлопок в рабочем пространстве печи с выбросом пламени и шлака.
Март 2004 г. ОАО «Северсталь», г. Череповец	В конвертерном цехе на участке перелива чугуна произошел разлив жидкого металла, погибло 3 человека [2].	Комиссия установила, что на отметке 14 метров участка перелива чугуна произошло разрушение грузового троса при транспортировке чугуновозного ковша.

Продолжение таблицы 1.1

Год и место аварии	Описание инцидента	Причина
04.12.1998, ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	Взрыв на конвейере №1. Один человек получил ожоги I степени, один человек получил ожоги II степени, двое, получившие ожоги II и III степени, скончались (пострадало 4 человека) [3].	Комиссия установила: взрыв полости конвейера произошел в результате падения кислородной фурмы с разрушением компенсатора на трубе подачи кислорода и попаданием охлаждающей воды в зону нахождения жидкого шлака, после падения кислородной фурмы произошло забивание гидробаков котла. Техническим фактором возникновения аварии явилось разрушение упорного бурта зубчатой обоймы вала электродвигателя и редуктора привода, что привело к нарушению соосности валов электродвигателя и редуктора системы опускания фурмы. Фиксировались многочисленные нарушения организации оборотов и осмотров оборудования.
06.02.2005. ОАО «Гусинноозерское литье» (республика Бурятия)	Пострадало 2 человека, один из них погиб [2].	Причина несчастного случая – приобретение и отгрузка партии металлолома, содержащей взрывоопасные предметы (артиллерийские снаряды), отсутствие входного контроля.
23.03.2006. Metallurgical комбинат «Азовсталь», г. Мариуполь	Авария на первой и четвертой домнах, ущерб \$54 млн [4].	На доменной печи №3 при проведении работ по подготовке печи к плановому капитальному ремонту вследствие отказа водяного охлаждения прогорели все фурмы на первой и четвертой домнах.
28.11.2006. ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	Взрыв и пожар в травильном отделении листопрокатного цеха. Погибло 2 человека, убытки \$24 млн. Пострадало 6 рабочих [4].	Нарушения технологического процесса.
14.01.2007 ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	Электросталеплавильный цех. Выброс расплавленного металла и пара. Пострадало 5 рабочих, трое из них госпитализированы [5].	Разгерметизация системы охлаждения произошла вследствие попадания воды в горячую зону сталеплавильной печи, что и привело к инциденту.
11.05.2007. ОАО «МАКСИ-ГРУПП». Нижнесергинский метизно-металлургический завод	Электросталеплавильный цех. Выброс горячего шлака Погиб 1 рабочий, пострадали 5 человек [6].	Причиной стало попадание воды из системы водяного охлаждения в активную зону сталеплавильной печи.
06.06.2007, ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	Машины непрерывного литья заготовок №2. Разрушение системы подачи гидравлической жидкости. Погибло 2 человека. [7, 8].	Рабочая жидкость гидропривода в результате разрушения трубопровода воспламенилась, что привело к гибели рабочих.

Продолжение таблицы 1.1

Год и место аварии	Описание инцидента	Причина
02.06.2010, ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	Кислородно-конвертерный цех, машина непрерывного литья заготовок № 6. Разлив металла на рабочую площадку и возгорание технологического оборудования.	Наиболее вероятная причина аварии – прогар или несанкционированное открытие шиберов.
21.11.2011, ПАО «Серовский трубопрокатный завод», г. Полевской	Электросталеплавильный цех. Разлив металла [9].	Выведены из строя кристаллизатор, система гидроподъема телеги, электрооборудование, система АСУТП. Комиссия установила, что инцидент произошел в результате разрушения шиберов стальной ванны.
13.10.2013. г. Новотроицк, Оренбургская область, ОАО «Уральская Сталь»	В сортопрокатном цехе вальцовщик стана горячей прокатки получил смертельные травмы [9]. Он находился на площадке для обслуживания чистой клетки, где и произошло падение подвески.	При движении мостового крана произошел обрыв каната и падение крюковой подвески механизма главного подъема.
19.11.2013. г. Саранск, ООО «ВКМ-СТАЛЬ»	В плавильном участке литейного цеха №01 в помещении печного трансформатора произошло возгорание, в результате произошло обрушение крыши цеха над помещением трансформатора (размеры образовавшегося проема 18×24 м), также произошло обрушение перекрытия помещения печного трансформатора. Причина обрушения – высокотемпературное воздействие на металлоконструкции перекрытий из-за возгорания печного трансформатора печи [9].	Замыкание в средней обмотке реактора печного трансформатора произошло по причине длительной (более 40 лет) эксплуатации печного трансформатора в режимах, близких к короткому замыканию, без капитального ремонта с вскрытием и заменой обмоток, а также без необходимого анализа результатов проводимых измерений.
20.07.2014. АО «Русполимет», Нижегородская обл.	Групповой несчастный случай со смертельным исходом произошел на рабочей площадке электродуговой сталеплавильной печи ДСП-6 в результате выброса расплавленных и раскаленных материалов из шлаковой чаши. Три человека получили тяжелые термические ожоги, один из них в результате полученных ожогов скончался в больнице [9].	Подготовка шлаковой чаши перед скачиванием шлака производится с нарушением, а именно: открытие внутренней поверхности шлаковой чаши известковым раствором производится путем выливания известкового раствора из ведра в шлаковую чашу. Попадание влажных материалов в расплавленный шлак и металл.
02.06.2014. Оренбургская область, г. Новотроицк, ОАО «Уральская сталь»	В коксовом цехе №1 в результате аварии произошло разрушение металлоконструкций в узле опирания верхних элементов пространственной фермы перекидного моста трубопровода аммиачной воды КБ №1. В результате аварии 6 работников КБ №1 получили травмы различной степени тяжести и еще один пострадавший скончался от полученных травм [9].	Отклонение от проектного положения в виде деформаций отдельных элементов металлоконструкции пространственной фермы моста газопровода КБ №1 КЦ 1 КХП в результате температурных воздействий с последующим его обрушением.

Продолжение таблицы 1.1

Год и место аварии	Описание инцидента	Причина
30.05.2014. ЗАО "Волгоградский металлургический комбинат "Красный октябрь"	Произошел взрыв с последующим возгоранием в сталеплавильном цехе [9].	В результате нарушения технологического процесса произошло попадание воды в сталеплавильный котел, и резкое вскипание воды привело к хлопку.
24.05.2015. ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»	На участке №2 по производству огнеупоров во время работы вращающейся печи №1 произошел групповой несчастный случай со смертельным исходом.[9].	Зависание марганцовистой извести в районе пересыпного колодца. Неудовлетворительная организация работ.
08.07.15. ОАО «ММК», г. Магнитогорск Челябинской области	В кислородно-конвертерном цехе на участке внепечной обработки стали (установка печь-ковш №1) произошел групповой несчастный случай [9]. Тяжелые термические ожоги получили 2 подручных сталевара.	Вскипание металла в ковше с выходом шлако-металлической смеси через борт ковша.

Как правило, опыт этих специалистов анализировался и использовался при разработке технологических карт ремонтов и правил эксплуатации объектов. Ресурс основной части оборудования оценивался часто только статистическими методами [1]. Не всегда такой подход приводил к снижению затрат на диагностирование и содержание технологического оборудования. Комплексный подход даёт решение данной проблемы. Комплекс диагностических мероприятий позволяет увеличить вероятность выявления дефектов оборудования. Согласно ГОСТ Р 53564-2009, комплексная система мониторинга состояния машинного оборудования должна включать в себя: «как минимум, контроль состояния и диагностирование по параметрам вибрации, тока и эксплуатационным параметрам».

Выявление состояний, предшествующих возникновению аварийных ситуаций, путём комплексного первичного мониторинга оборудования весьма важно для обеспечения безопасности персонала. В качестве примера (таблица 1.1)

приведены наиболее значимые инциденты, произошедшие на предприятиях отрасли за последние двадцать лет. Причем, кроме угрозы жизни и здоровью работников, подобные инциденты наносят значительный материальный ущерб, что снижает эффективность производства.

Рассматривая аварийные инциденты, происходящие на металлургических заводах нашей страны и ближнего зарубежья, можно заметить, что распределение аварий неравномерно по видам оборудования и по первичным причинам. Анализ аварий на металлургических предприятиях нашей страны (таблица 1.2) показывает, что в основном они связаны с нарушением функционирования систем охлаждения и управления.

Так, прогары конструкций, уходы металла занимают не менее 39% от общего числа аварий и, как правило, прямо или косвенно связаны с работой систем охлаждения.

Аварийные ситуации, как показывает их анализ, возникают и при отказах гидравлических систем как основного, так и вспомогательного оборудования. Даже беглый анализ инцидентов показывает, что 41% аварий связан с нарушениями тепловых режимов оборудования, а 25% – с отказами гидравлических приводов и средств автоматики. Рассматривая аварии на производстве, анализируя отказы по видам технологических цепочек, можно заметить, что совершенствование технологии металлургического производства позволит значительно уменьшить потери, связанные с аварийностью.

Анализ общего числа крупных аварий показывает, что для металлургической отрасли тяжелых аварий, связанных с разливом металла, становится меньше, превалируют аварии, связанные с длительной безремонтной эксплуатацией, несоответствием материалов, ошибками монтажа, теми факторами, вредное воздействие которых может быть значительно снижено грамотной организацией диагностики обслуживания и ремонта (рисунок 1.2, таблица 1.3).

Как показывают приведенные данные, наибольшее количество аварий происходит при эксплуатации технических устройств.

С 18 века основным в металлургической отрасли являлся ремонт по факту отказа, что было характерно для малых предприятий периодического цикла или для оборудования с малой и хаотичной загрузкой такой подход встречается и в наши дни.

Таблица 1.2 – Аварийные ситуации в металлургии [10]

Вид аварии	Частота аварий за исследуемый период
Разрывы кожуха доменных печей	1,1
Разрывы, листовых линейно протяженных металлических конструкций (ЛЛПМК)	5,5
Взрывы в металлургических агрегатах	6,6
Обрушение зданий	6,8
Пожары	13,2
Уход металла, шлака из металлургических агрегатов	18,7
Прогар горна, фурм, холодильников, воздухопроводов доменных печей	20,9
Взрывы в металлургических агрегатах из-за подачи сырой шихты, прогар фурм	25,3

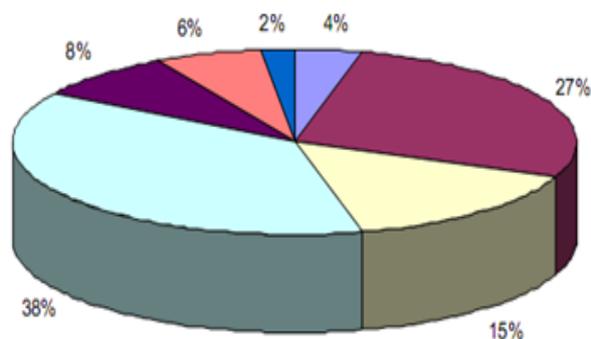


Рисунок 1.2 – Анализ причин аварий в металлургической отрасли [10], %:

38 – неправильная или длительная эксплуатация; 27 – ошибки изготовления и монтажа; 15 – несоответствие примененных материалов, низкое качество материалов; 8 – ошибки на стадии проектирования; 6 – нарушения проектных решений ; 4 – недостатки норм проектирования и правил монтажа; 2 – ошибки проектных организаций

Таблица 1.3 – Число аварий в металлургическом комплексе [10]

Вид аварии	Год								
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Выброс расплавленного металла	4	3	1	–	–	–	–	–	–
Обрушение зданий и сооружений	–	–	2	1	1	–	–	2	1
Разрушение технических устройств	2	1	1	2	1	3	2	2	1
Итого:	6	4	4	3	2	3	2	4	2

Метод обслуживания, при котором ремонт или замена оборудования производится только в том случае, если оно выходит из строя или полностью вырабатывает свой ресурс, часто именуется реактивным (реагирующим) техническим обслуживанием.

Реактивное (реагирующее) обслуживание имеет ряд недостатков: возможность внеплановых простоев из-за внезапных отказов оборудования и

дорогостоящий и продолжительный ремонт из-за серьезности и обширности дефектов. Одновременно с выгодой от полного использования ресурса отдельных видов оборудования такой подход не позволял планировать ремонтные мероприятия и оптимизировать штат ремонтного персонала, планировать с высокой эффективностью парк запасных частей, так как есть вероятность внезапного отказа нескольких различных агрегатов одновременно, поэтому необходимость в ремонтных работах может превысить возможности ремонтной службы предприятия. Кроме того, аварийный отказ одного элемента в металлургической технике часто сопровождается лавинообразным разрушением исправных элементов технологической цепочки, а это приводит к значительным издержкам производства. Этот вид обслуживания был вызван отсутствием надёжных методик оценки состояния оборудования. Развитием явилось создание системы плано-предупредительных ремонтов.

Обладая достаточной простотой, эффективностью и внутренней целостностью, данная система нашла широкое применение первоначально на заводах Советского Союза, а затем, в 50-х, активно изучалась и в странах дальнего зарубежья. Необходимо отметить, что система затрагивала вопросы не только оценки состояния оборудования, обслуживания и ремонта, но и проектирования оборудования [12]. Высокая эффективность отечественной системы плано-предупредительного обслуживания сохраняется только при соответствии нормативных межремонтных промежутков фактическим, определяемым реальным износом, оцениваемым или анализом аварий, или методами диагностики.

Оценивая состояние оборудования в металлургической отрасли Российской Федерации, необходимо заметить значительное обновление производственного парка. Интенсивно внедряются новые технологические процессы, новое оборудование, спроектированное, а зачастую и изготовленное за пределами страны. Меняется и система управления производственными процессами. Цифровые системы управления механическими и гидравлическими приводами создают устойчивую конкуренцию аналоговым блокам конечного управления.

За последние 20 лет произошли коренные изменения в вопросе проектирования оборудования не только металлургических заводов, но и предприятий машиностроительной отрасли [11,12]. Широкое внедрение систем автоматизированного диагностирования оборудования позволило снизить стоимость ремонтных работ и работ по обслуживанию [11]. Каждый ремонт, выполненный вне контрольных сроков, подвергается экспертному анализу. Большинство работ по обслуживанию и ремонту предусматривает установление периодов на основе распределения частоты отказов оборудования [12, 13]. В то же время производители оборудования, в том числе и металлургического, зачастую еще на этапе проектирования исключают возможность проведения ремонтных работ, сходных по сложности с капитальными ремонтами в понимании отечественных специалистов, что увеличивает роль диагностических мероприятий.

Резкое, в ряде случаев на несколько порядков, снижение цены первичных датчиков контроля состояния оборудования позволило создавать самодиагностирующиеся системы промышленных агрегатов. Если первые компьютеризированные системы управления техническим обслуживанием (Computerized Maintenance Management Systems (CMMS)) появились в 80-х годах прошлого века в США и были разработаны для сокращения затрат на обслуживание оборудования и повышение производительности, то современные системы комплексного управления основными фондами (Enterprise Asset Management (EAM)) позволяют управлять всем жизненным циклом оборудования – от проектирования, изготовления, монтажа и сборки до последующего обслуживания ремонтных и профилактических работ, модернизации, реконструкции и списания. Включают EAM системы и функции мониторинга эффективности работы оборудования.

Современное оборудование создается уже с использованием подобных разработок. Естественно, меняются подходы к ремонту и обслуживанию оборудования, оснащенного или спроектированного с использованием современных технологий. Гораздо больше внимания начинает уделяться

проблемам диагностики, поскольку возникновение отказов оборудования приводит к значительным издержкам. Не менее важным является вопрос, какую часть оборудования подвергать диагностике и на каком уровне производить диагностику объектов. Анализ статистики отказов позволил выявить критические зоны отказов. На рисунке 1.2 выделены критические зоны металлургического оборудования простои которого влекут максимальные потери производства и затраты на ремонт.

Особенностью современного состояния металлургических предприятий является достаточно высокая насыщенность как оборудованием, созданным более 30 лет назад, спроектированным с учетом длительной эксплуатации при своевременном проведении циклов работ по обслуживанию и ремонту (на ряде предприятий доля этого оборудования более 60% [14]), так и современным оборудованием, смонтированным в течение последних 10-20 лет зарубежными компаниями.

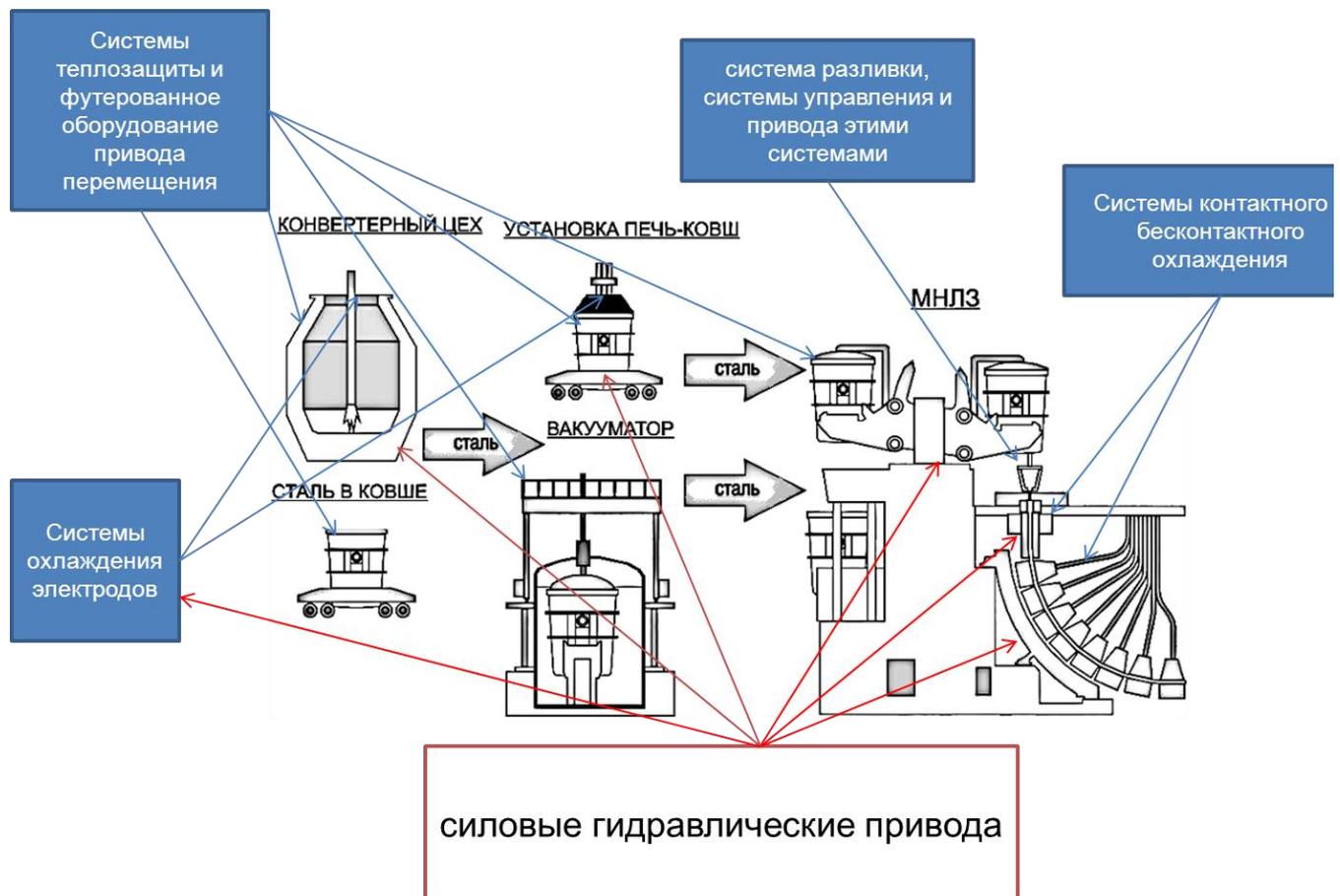


Рисунок 1.2– Критические зоны металлургического оборудования

Особенности эксплуатации и диагностирования этого оборудования на предприятиях России эксплуатационным персоналом, как правило, в расчет не принимались. В этих условиях особенно остро поднимаются вопросы повышения эффективности производства путем снижения затрат на ремонты и обслуживание техники с одновременным сокращением простоев и снижением себестоимости продукции, что невозможно без решения проблемы комплексной диагностики слабо проработанной на данный момент времени.

Важной является задача снижения аварийности и возможности нанесения вреда окружающей среде. Это актуально для систем теплозащит, силового гидравлического и теплогенерирующего оборудования [15,16]. Не менее острой задачей является и оптимизация поставок запасных частей к металлургическому оборудованию. Формирование парка запасных частей только на основе анализа статистики отказов не всегда возможно и целесообразно, метод экспертных оценок также неэффективен при наличии принципиально нового оборудования, применяемого в производстве. Одним из весьма эффективных методов в этом плане является метод оценки остаточного ресурса путем отслеживания диагностируемых параметров системы. Снижения затрат на эксплуатацию возможно путём повышения достоверности определения остаточного ресурса элементов современного металлургического оборудования методами комплексного диагностирования.

Требования к комплексному подходу к диагностированию технических объектов должны базироваться на анализе существующих методов оценки состояния оборудования.

1.2. Критический анализ современных подходов к диагностированию элементов металлургического оборудования

Важность отслеживания состояния оборудования методами неразрушающего контроля и диагностирования давно осознана на подавляющем большинстве металлургических предприятий. На большинстве предприятий сложилась практика разделения служб по направлениям: служба, отвечающая за

функционирование гидравлического оборудования, служба электриков, службы, обслуживающие дискретно-управляющие и силовые электрические цепи и работу систем автоматического управления. Зачастую такое разделение способствует возможности возникновения простоев при комплексном отказе оборудования. Традиционное разделение сфер ответственности между различными службами предприятия, осуществляющими ремонт и обслуживание того или иного технологического оборудования или элементов этого оборудования, часто затрудняет процесс оценки реального состояния объекта поскольку оценка состояния оборудования осуществляется локализовано, без применения комплексного подхода. Некоторые предприятия пошли по пути объединения разрозненных служб в единую систему. Но, как показывает практика, этот подход оказывается эффективным лишь при значительном улучшении квалификации ремонтного и обслуживающего персонала.

Кроме того, не всегда целесообразно укомплектовывать каждую службу своим диагностическим комплектом дорогостоящего оборудования. Одним из путей повышения эффективности обслуживания оборудования в этих условиях является создание структурных подразделений в рамках крупных предприятий, возложение на них функций анализа качества эксплуатации техники, решения сложных задач технического диагностирования, выявления причин потери оборудованием ресурса путем комплексной диагностики с изначальной ориентацией на проактивное его обслуживание. Под техническим диагностированием понимается определение технического состояния объекта. А основными задачами диагностирования являются: контроль технического состояния; поиск места и определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния [ГОСТ 20911-89].

Проактивное техническое обслуживание оборудования заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока его эксплуатации в результате применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов, а также в выполнении необходимых ремонтных воздействий, направленных на снижение скорости развития или устранение неисправностей,

которые выявлены на основе сведений о фактическом техническом состоянии оборудования.

Целями, преследуемыми при внедрении проактивной формы обслуживания, являются:

- оптимизация затрат на техническое обслуживание и ремонт основного технологического оборудования;
- увеличение срока службы основного технологического оборудования;
- снижение вероятности отказов;
- выполнение только необходимых ремонтных воздействий;
- снижение общего объема требуемого технического обслуживания;
- энергосбережение.

На существующем этапе развития металлургической отрасли более 50% предприятий организовали собственные службы либо используют сторонние организации, как правило, специализирующиеся на определенных методах диагностики или на диагностике отдельных видов оборудования. Типовое оснащение служб диагностики реализуемые функции приведены на рисунке 1.3.

ОСВОЕНИЕ ФУНКЦИЙ ОТДЕЛОМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ



Реализованные функции

- Мониторинг состояния систем смазки.
- Балансировка и центровка энергетического оборудования.
- Вибродиагностика оборудования.
- Выверка геометрии и высотного положения оборудования.
- Плано-высотная съёмка подкрановых путей.
- Ультразвуковой контроль деталей.
- Тепловизионный контроль оборудования, зданий.
- Выявление контрафактных смазочных материалов.
- Хроматография трансформаторного масла.
- Эндоскопия труднодоступных элементов.
- Восстановление технологической точности оборудования.
- Определение износа направляющих трубонарезных и муфтонарезных станков финишного центра.
- Выполнение геодезических съёмок конструкций.
- Обеспечение выходного контроля качества запчастей.
- Толщинометрия трубопроводов и травильных ванн.
- Измерение расхода жидкостей без врезки в трубопровод.
- Реализация функции по обеспечению необходимых измерений в области производственного контроля объектов по требованиям Ростехнадзора.



Планируемое развитие

- Внедрение стационарной системы на непрерывный стан ТПУ 30-102.
- Оценка состояния фундаментов технологического оборудования.
- Оценка качественных показателей применяемых смазочных материалов.
- Подбор более эффективных видов смазки в замен существующих.
- Обеспечение контроля нагрузок на трансмиссиях приводов прокатных станов в период опытных прокаток и в процессе эксплуатации для определения критически нагруженных элементов.
- 3D сканирование объектов.

Рисунок 1.3 – Освоение функций диагностирования оборудования на примере группы ЧТПЗ

Применяемый типовой набор оборудования и типовые методики контроля зарекомендовали себя как надежные источники информации о текущем техническом состоянии оборудования, агрегатов, зданий и сооружений. Каждый из методов рекомендован к применению на тех или иных видах оборудования.

Но комбинированные методы контроля оборудования и методики оценки остаточного ресурса недостаточно отработаны, и создание как оборудования для комбинированной диагностики, так и методики оценки ресурса элементов металлургического комплекса весьма актуально.

Так широко применяемые методы контроля электрических параметров приводных машин, не способны на ранних стадиях выявлять дефекты вызванные усталостным разрушением статоров, а методы контроля вибрации способные решать эти задачи, как правило, не применяются. Для контроля состояния

гидроприводов металлургического оборудования используются методы оценки внутренних и внешних утечек фиксирующие уже возникшие отказы, методы оценки вибрации, температурные поля, позволяющие отслеживать в комплексе развитие дефектов не используются системно.

В процессе эксплуатации параметры оборудования изменяются, вследствие износа. Чтобы измерить степень износа в данный момент и спрогнозировать его изменение на ближайшее время, необходимо знать закономерность изменений параметров оборудования под воздействием типичных эксплуатационных факторов. К изменениям параметров механизмов могут привести постепенный или внезапный отказы механизма. Оценка изменения этих параметров – одна из функций технической диагностики, которая по определению состояний технических объектов традиционно решает три типа задач:

- Определение текущего состояния технического объекта.
- Предсказание изменения технического состояния объекта. Определение оптимальных периодов диагностирования и ремонта.
- Определение причин отказов и аварийных состояний.

Как правило, для решения первых двух задач используют методы неразрушающего контроля. Его базовыми методами являются:

- оптический (визуальный);
- метод магнитной дефектоскопии;
- метод ультразвуковой дефектоскопии;
- акустический;
- метод вибрационной диагностики;
- рентгеновский;
- капиллярный метод;
- люминесцентный;
- капиллярный метод цветной дефектоскопии;
- метод контроля температурные поля;
- метод анализа рабочих параметров;
- метод контроля продуктов износа в рабочих средах и смазках;
- методы контроля герметичности;
- методы диагностики по потребляемой мощности и КПД;
- метод эталонных параметров;

– методы контроля линейных перемещений и т.д. Естественно, вероятность выявления того или иного дефекта оборудования различными методами разная и может оцениваться статистическими критериями[13]. Для оценки остаточного ресурса применяются регрессионные зависимости, получаемые анализом превалирующих диагностических параметров [13]. Методика расчётного определения зон отказов не применяется. Проведённый автором анализ проблем служб диагностики предприятий позволяет представить основные направления

Краткий обзор существующих и применяемых на производстве методов и способов показывает, что существующие методы диагностики способны перекрыть базовые потребности предприятий.

Анализ литературных источников и наблюдения за работой служб диагностики предприятий позволили сформулировать основные направления и проблемы, схематично представленные на рисунке 1.4



Рисунок 1.4 – Основные направления и проблемы эксплуатации и диагностирования металлургического оборудования.

Но опыт применения средств диагностики показал, что на предприятиях, как правило, реализуют локальные схемы использования диагностического оборудования, наиболее часто подбираемые исходя из интересов конкретных служб, таких как механики, служба электриков, специалисты АСУТП и т.д. Это часто приводит к дублированию дорогостоящего оборудования и снижению эффективности его использования. Некоторые предприятия (ОАО «ПНТЗ»,

УГМК, ЕВРАЗ) создали службу диагностики, сосредоточив все диагностическое оборудование в одних руках.

Этот подход позволил снизить расходы на эксплуатацию металлургического оборудования, в частности, на Первоуральском новотрубном заводе. Централизация в одних руках оборудования диагностирования создаёт предпосылки для реализации комплексного подхода оценки состояния объектов. Однако, такой подход ещё не гарантирует комплексного подхода к диагностике поскольку не включает методик комбинированного диагностирования оборудования с системой моделирования процессов и анализом остаточного ресурса по комплексу параметров. Основное отличие комплексного подхода от общепринятого состоит в наличии комплексного заключения, выдаваемого службой диагностики с учетом всех имеющихся данных по измерениям и по накопленной статистике с расчетом вероятного времени отказа узла или элемента.

Разрабатывая методики комплексного диагностирования оборудования металлургических производств необходимо понимать, что каждый из видов оборудования обладает своими особенностями функционального назначения. Даже при применении единого комплекса первичного диагностирования каждая из этих систем будет обладать своим набором критических параметров меняющимся в течении эксплуатации индивидуально.

Наиболее характерными особенностями обладают следующие элементы металлургического оборудования: элементы теплозащиты, системы разлива жидкого металла, системы охлаждения, гидравлические системы, теплогенерирующие системы.

1.3 Анализ диагностики и отказов теплозащиты элементов металлургического оборудования

Основу технологической цепочки составляют дуговые сталеплавильные печи средней и большой вместимости 50-200 т/ч при удельном расходе электроэнергии 250-450 кВт/ч и средней длительности плавки 45-60 минут [16].

Если для печей малой мощности была характерна неохлаждаемая теплоизоляция стен и свода печи, что не только ограничивало максимальные потоки тепла, но и снижало их потери [17, 18], то рост подводимой мощности повышал температуру горячей зоны теплоизоляции, что приводило к резкому сокращению срока ее службы, тем самым ограничивало максимальную производительность печей [19]. Интенсивное разрушение обычно наблюдалось в зоне контакта с жидким шлаком, а также в зонах свода и стен, расположенных рядом с электродами [17].

Дальнейший рост мощности печей потребовал создания системы водоохлаждаемой теплоизоляции. Снятие ограничения на увеличение тепловой мощности за счет системы охлаждения одновременно увеличило отвод тепла, изменило характер теплообмена в зоне жидкий металл –шлак и теплоизоляции. Температура шлака снизилась по сравнению с конструкцией с пассивной теплоизоляцией [1]. Основной поток тепла передается через подэлектродную зону и через шлак вокруг электродов. Интенсифицировать передачу тепла в этом случае удастся благодаря конвективному теплопереносу. Наиболее ответственным узлом, обеспечивающим надежность агрегатов «ковш-печь», является футеровка [20]. К огнеупорным материалам предъявляются высокие требования по термической и химической стойкости к расплавленным металлам и шлакам, к коэффициентам термического расширения и прочности. Для футеровок применяют изделия и неформованные массы на основе $MgO-Cr_2O_3$, $Al_2O_3, MgO-Mg_2O_3-C$. Считается, что стойкость теплоизоляции днища и боковых стен обеспечивается от 40 до 70 плавов [18]. К числу наиболее изнашиваемых элементов теплоизоляции сталеразливочных ковшей, а также агрегатов «ковш-печь» (рисунок 1.4) относят зоны шлакового пояса, контакта падающей струи металла на днище, контакта футеровки с движущимся металлом под воздействием газа продувки, продувочного и сталевыпускного узлов. Считается, что причинами быстрого разрушения шлакового пояса являются контакты с шлаками на основе CaO и CaO_2 и с оксидами марганца и железа, а также значительный тепловой поток при электродуговом подогреве металла и резком нагреве и охлаждении при

заполнении и опорожнении ковша. Стойкость шлакового пояса зависит и от сортамента обрабатываемой стали. Дополнительно на скорость износа футеровки стен оказывает влияние донная продувка аргоном [21].

Если при равномерном износе для футеровки стен считается минимально допустимая толщина рабочего слоя в 20-25 мм, то из соображений безопасности ее увеличивают до 50-160 мм, а толщину теплоизоляционного слоя до 60 мм и более. Для зон шлакового пояса толщину футеровки увеличивают дополнительно [19]. По сравнению со стойкостью стенок ковша днище обладает более низкой стойкостью футеровки. Это связано с наличием контакта со струей расплавленной стали при пуске, что вызывает интенсивный размыв теплоизоляции. Снижают стойкость также и продувочные устройства, выполненные по днищу ковша.

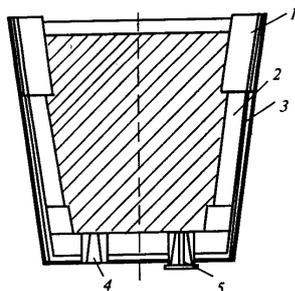


Рисунок 1.4 – Схема футеровки «печь-ковш»:
1 – шлаковый пояс; 2 – рабочий слой; 3 – теплоизоляционный слой;
4 – узел продувки; 5 – сталевыпускной узел

Ряд производителей зону падения струи жидкого металла выполняет из более стойкого к эрозии материала.

Основными дефектами футеровки стен и днища «печь-ковшей» являются: длинные трещины глубиной от 30 до 50 мм, а также сеткообразные

трещины глубиной до 100 мм, химическая эрозия и абразивное разрушение под действием расплавов шлаков и металлов (последний вариант более характерен для теплозащит с низким качеством мертеля и большой толщиной шва). В донной зоне преобладает структурное растрескивание и химическая эрозия в зоне падения струи металла. При этом распределение скорости износа по зонам футеровки неравномерно. По данным Смирнова А.Н. [1], скорость износа футеровки весьма различна (таблица 1.4 и рисунок 1.5). Изменение толщины теплозащитного покрытия в условиях значительных температурных деформаций приводит к неравномерности распределения внутренних напряжений и увеличивает вероятность разрушения футеровки [20].

Таблица 1.4 – Данные износа футеровки различных зон

Наименование зоны	Скорость износа футеровки, мм/плавку
Бойная зона стенки	3.5-3.7
Зона контакта с восходящими потоками	2.2-2.5
Зона контакта с нисходящими потоками	2,0-2.4
Базовые зоны стенки	1.4-1.6
Бойная зона днища	3.2-3.4
Зона продувочного узла в днище	4.5-4.7
Зона восходящих потоков шлакового пояса	5.5-5.9
Зона нисходящих потоков шлакового пояса	4.9-5.1
Базовые зоны шлакового пояса	3.1-3.3
Базовые зоны днища	2.6-2.8

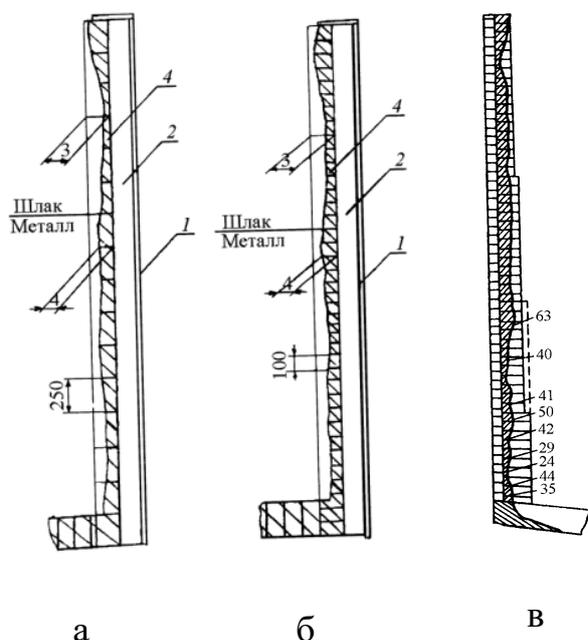


Рисунок 1.5 – Зависимость износа футеровки сталеразливочных ковшей:

1 – корпус; 2 – контрольный слой;
 3 – исходная толщина; 4 – остаточная толщина; а – изделия формата «Р»;
 б – изделия формата «миниkey»; в – износ футеровки ковша Череповецкого металлургического комбината [19]

Последнее делает весьма актуальным разработку методик контроля состояния огнеупоров промковша и других элементов, контактирующих с горячим металлом и шлаком. Кроме того, даже беглый анализ аварий металлургических агрегатов показал значительную опасность разрушения элементов систем не только пассивной, но и активной теплозащиты [22]. Так, разрушение водоохлаждаемых панелей приводит к контакту воды с расплавленным металлом, сопровождаемым

обычно паровым взрывом и выбросом металла и шлака, что приводит к тяжелым последствиям. Поэтому разработка элементов систем диагностического контроля за состоянием теплоизоляции представляется весьма актуальной. На сегодняшний день, для оценки состояния футеровок и элементов силовых конструкций применяют методы толщинометрии, ультразвукового контроля, метод оценки внешних температурных полей, металлографические исследования. Рассмотрим эти методы подробно. Ультразвуковая толщинометрия в отличие от измерения толщины механическим способом позволяет производить обследование замкнутых конструкций, не вызывает повреждений оболочек, в ряде случаев позволяет обследовать оборудование без его остановки. В последние годы появились ультразвуковые дефектоскопы на фазированных решётках, что позволило формировать трёхмерное распределение толщин с локализацией дефектов в исследуемых конструкциях. Недостатком метода является падение точности результатов замеров в многослойных конструкциях с газовыми прослойками. Метод оценки внешних температурных полей эффективен, но требует грамотной трактовки результатов замеров. Наиболее часто 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 температурных полей практически не разработана. Металлографические исследования исследования весьма информативны, позволяют выявлять ранние дефекты, возникающие в металлах при нагружении и нагреве, но, как правило, требуют вывода оборудования из эксплуатации на момент проведения исследования. Требуют проработки вопросы бесконтактных методов оценки состояния оборудования. Все рассмотренные методы применяются индивидуально, методики комплексной оценки состояния оборудования, как правило, не применяются.

1.4 Особенности отказов систем разливки жидкого металла

Промежуточный ковш, являясь одним из ключевых элементов машины непрерывного литья заготовок, во многом определяет устойчивость и

стабильность процесса разливки, а, следовательно, и качество получаемого продукта.

Поскольку после промежуточного ковша металл поступает непосредственно в кристаллизатор, то конструкция промковша и стопора промковша (рисунок 1.6) должна обеспечивать минимальные тепловые потери, минимизировать контакт жидкого металла с кислородом и шлаком, не допускать засорения расплава неметаллическими включениями, для многоручьевых машин должна обеспечиваться минимальная разница между температурами расплавленной стали отдельных зон выпуска.

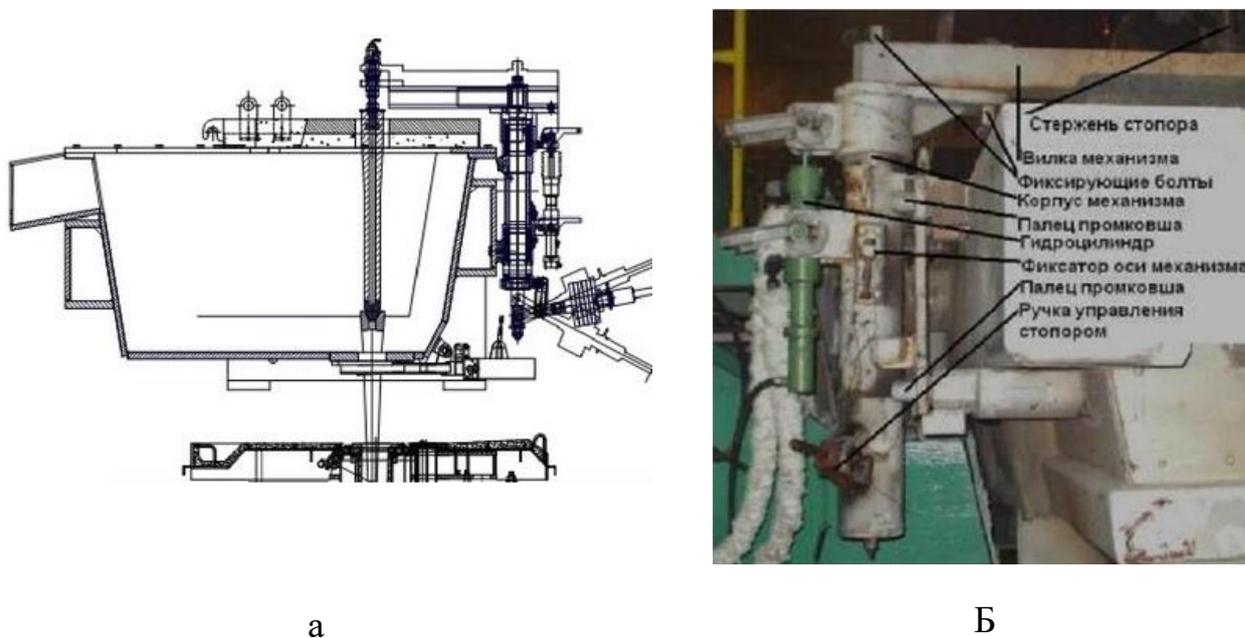


Рисунок 1.6 – Схема (а) и вид (б) узла стопора промковша

Крайне важное значение для получения качественной заготовки представляет требование поддержания температуры стали в промежуточном ковше на $25-30^{\circ}\text{C}$ выше температуры ликвидус металла.

Превышение оптимальных температур перегрева значительно ускоряет эрозию огнеупоров (особенно при разливке сталей 13ХФА, 20А, 09Г2С) в зоне стопора отсечки (рисунок 1.6), последнее может приводить к возникновению аварийных ситуаций. Недостаточно нагретый металл вызывает наличие на

зеркале металла в кристаллизаторе корки, вызывающей дефекты заготовки. По этой причине системе стабилизации температуры в промежуточном ковше уделяется весьма пристальное внимание.

Не менее важна система узлов разливки сталей. Различают разливку открытой и закрытой струей. Система разливки открытой струей применяется, как правило, при отсутствии необходимости жесткого контроля макроструктуры при прокатке. Система разливки закрытой струей с использованием системы контроля расхода металла с помощью стакана-дозатора и стопора-моноблока на сегодняшний день становится основной (см. рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Эрозия – результат воздействия агрессивных марок стали на стопор

Система стопора-моноблока обеспечивает не только аварийную отсечку металла, но и регулирование поступления металла в кристаллизатор, а в ряде конструкций и продувку аргоном.

Конструкция стопора предусматривает возможность изменения его положения для регулирования подачи жидкого металла. Регулировку осуществляют, как правило, используя следящий или дискретно управляемый гидравлический привод.

На качество работы этого важнейшего узла оказывают влияние такие факторы, как механические повреждения; эрозия, вызываемая высокотемпературной струей металла и агрессивным воздействием легированных

сталей (рисунок 1.7); забивание проходных сечений неметаллическими включениями, продуктами разрушения футеровки и мертеля. Кроме стопора-моноблока используются и регулирующие шиберные затворы, хотя и гораздо реже. Рассматривая аварийные ситуации, возникающие при нарушении функционирования механизма регулирования стопора-моноблока, необходимо отметить тяжесть последствий подобных происшествий. Так, в результате аварии 21.11.2012 года на Северском трубном заводе (рисунок 1.8) полностью залита металлом разливочная площадка, выведены из строя технологический инструмент (рама качания, кристаллизатор, затравка и сегменты), а также гидроблоки подъема телеги, привода, рельсовый путь, электрооборудование и электроника.



Рисунок 1.8 – Последствия аварии
21.11.2012 года

Для предотвращения подобных инцидентов, как правило, используют несколько путей: совершенствование огнеупоров и конструкции стопора, стакана дозатора и в ряде случаев погружного стакана; совершенствование системы управления регулированием подачи металла; создание систем аварийной отсечки металла и систем непрерывной бесконтактной диагностики и контроля состояния узлов промежуточного ковша и силовых приводов.

Так как в качестве последних часто используются гидравлические системы с условиями их функционирования, значительно отличающимися от принятых в

общемашиностроительной практике, то разработка методов их диагностики представляется актуальной.

Наиболее часто для оценки состояния узлов промежуточного ковша используется органолептический контроль доступных элементов, толщинометрия, контроль внешних температурных полей. Элементы гидропривода контролируются на факт отработки подаваемого сигнала, в ряде случаев, по внешним утечкам и анализу состояния рабочей жидкости. Если методики оценки состояния футеровки в целом удовлетворяют эксплуатирующий персонал, но не предотвращают аварийные ситуации, то методики контроля периодически действующих гидравлических систем и, в частности, систем аварийной защиты не дают полной и достаточной информации о состоянии объекта. Анализ отказов указывает на необходимость наличия системы непрерывного диагностирования состояния футеровки и бесконтактной диагностики систем гидропривода.

1.5 Особенности диагностирования элементов систем охлаждения металлургических машин

Кристаллизаторы машин непрерывной разливки стали являются наиболее важной частью оборудования технологической цепочки [1]. От надежной работы этого устройства во многом зависит качество получаемой заготовки и стабильность технологического процесса. Именно интенсивностью отвода тепла определяется кристаллизация расплавленного металла, создание твердой периферийной оболочки, способной выдержать давление жидкого металла. Основой любого кристаллизатора является система охлаждения. Как правило, находит применение система жидкостного охлаждения. В качестве теплоносителя используется техническая вода или негорючая жидкость. Наибольшее распространение получили две системы организации циркуляции теплоносителя – прямоточная и петлеобразная. При прямоточной системе охлаждения теплоноситель проходит охлаждающие секции в режиме противотока снизу вверх однократно. При петлевой системе организации движения теплоноситель проходит по системе, многократно меняя направления своего движения. Так как

интенсивность теплосъема зависит от термического сопротивления стенки и параметров движения теплоносителя, то от стабилизации этих параметров зависит надежность системы охлаждения.

Рассмотрим каждый параметр отдельно. Сам кристаллизатор представляет собой многослойную стенку. Для формирования стальных заготовок на линиях непрерывной разливки стали применяют кристаллизаторы из меди [1]. Рабочую поверхность кристаллизаторов гальваническим путем покрывают защитным металлическим слоем, например, хромом [21]. Адгезия такого покрытия к металлу основы, особенно при высоких температурах разливаемого металла, мала [22]. Разрушение защитного слоя в процессе работы приводит к уносу расплавом и кристаллизующейся заготовкой металла кристаллизатора, что, в свою очередь, определяет его ресурс. С теплотехнической точки зрения это приводит к локальному изменению, как правило, уменьшению, термического сопротивления стенки, а, следовательно, к локальному увеличению теплосъема, что увеличивает зону кристаллизации и меняет характеристики кристаллизующейся пленки, интенсифицируя дальнейшее разрушение поверхности. Увеличение ресурса покрытия рабочей поверхности кристаллизатора позволит получить значительную экономию как прямых, так и косвенных затрат и повысить качество получаемых стальных заготовок [22]. Здесь также существует несколько путей. Наиболее часто стараются увеличить стойкость покрытия. Для осуществления обозначенной задачи предлагается нанесение защитных однослойных покрытий из различных металлов путем их сплавления (с перемешиванием) с материалом основы и получением сэндвича «материал основы–сплав материала основы с материалом защитного покрытия–материал защитного покрытия» [22]. Материал защитного покрытия на подготовленную поверхность основы наносится, как правило, путем магнетронного напыления в вакуумной камере. Подготовка поверхности основы, расплавление и перемешивание материала защитного покрытия с материалом основы (а также ряд дополнительных операций) осуществляются электронным лучом в условиях вакуумной камеры. Также широко применяются гальванические покрытия. Оборудование и технологии

разработаны и апробированы. Возможно изготовление защитных покрытий из нескольких слоев различных металлов [23].

Вторым направлением является создание качающегося движения кристаллизатора. По мере кристаллизации корка твердеющего металла претерпевает усадку и несколько отходит от стенки кристаллизатора. Наиболее плотная зона наблюдается в районе мениска жидкого металла. Прилипание корки в этой зоне может привести к разрыву твердеющей корки и вытеканию стали. Качание кристаллизатора создает знакопеременные напряжения в кристаллизирующейся пленке, что препятствует «зависанию» пленки и образованию поперечных трещин на слитке [15]. Реализация «колебательного» движения потребовала создания отдельных механизмов качания, причем распространены схемы как с электрическим, так и с гидравлическим приводом. Схема зоны стабилизации приведена на рисунке 1.9. Не менее важно рассмотреть вопрос организации самого режима охлаждения. Здесь необходимо четко понимать, что возрастание скорости движения теплоносителя в одном из каналов, например, вследствие падения вязкости при нагреве жидкости, приводит в случае параллельного включения каналов к падению скорости и, как следствие, к уменьшению теплосъема в других каналах. Последнее приводит к повышению не только температуры стенки, но и с определенной задержкой температуры теплоносителей, изменению вязкости и режима теплосъема.

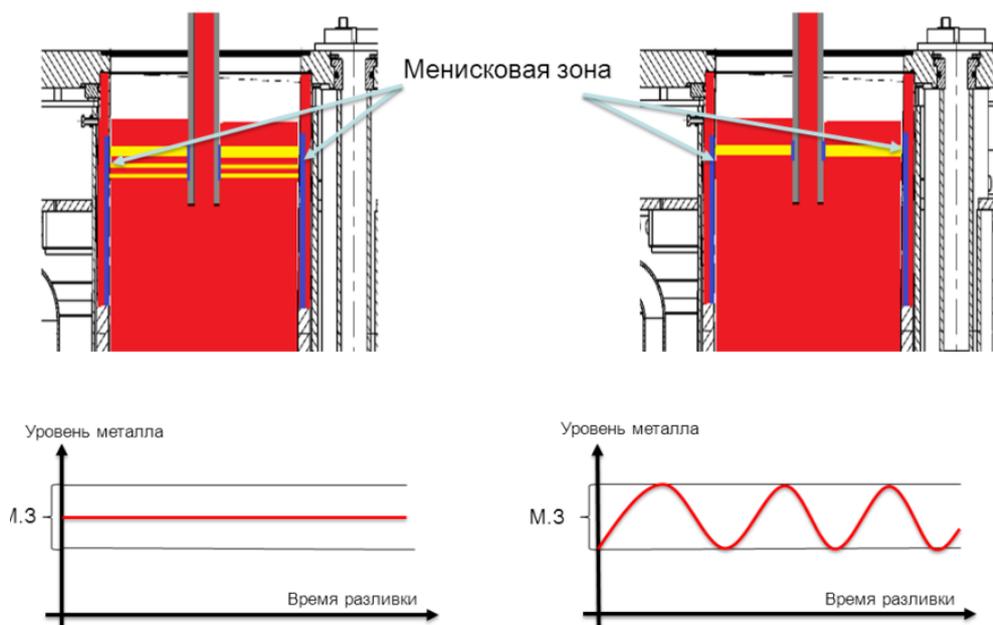


Рисунок 1.9 –
Стабилизация зоны
кристаллизации
при качании
кристаллизатора

Рассматривая теплообмен между стенками каналов и теплоносителем, следует учитывать эффекты выпадения солей из жесткой воды, особенно это критично для воды, не прошедшей химподготовку. Интенсивное выпадение осадков наблюдается для не прошедшей подготовку воды при превышении температуры в 70°C . При этом теплопроводность осадка в сотни раз ниже теплопроводности базового материала кристаллизатора, что приводит к локальному уменьшению отбора тепла от металла и повышению температуры горячей стенки. Кроме эффектов выпадения солей жесткости при температурах выше 40°C происходит интенсивный рост органических загрязнений, также снижающих теплоотдачу. Эти эффекты работы систем охлаждения могут резко снизить надежность работы кристаллизатора, а, следовательно, создание систем диагностики системы охлаждения является весьма актуальной задачей. Применительно к кристаллизаторам МНЛЗ задачи контроля состояния можно разделить на контроль состояния защитного покрытия в момент его нанесения, на задачи контроля как системы охлаждения, так и задачи контроля остаточного ресурса системы качания. Сегодня для контроля функционирования систем охлаждения широко применяется метод замера температур охлаждающей среды в отдельных зонах каналов. Контроль состояния системы качания осуществляется,

как правило, методом отклика на эталонный сигнал. При использовании гидравлической системы качания осуществляется контроль внутренних перетечек в распределителях привода, контролируется состояние рабочей жидкости. Эти мероприятия наиболее часто проводятся вне системного подхода. Контроль состояния защитного покрытия осуществляется на стадии изготовления методами разрушающего контроля образцов, методами замера толщины покрытия механическим или ультразвуковым методом, применяются широко и металлографические исследования. Методики контроля покрытия непосредственно в гальванической ванне, ещё на этапе производства, не выявлены. Методики контроля состояния гидравлических приводов качания, применяемые на предприятиях, позволяют лишь констатировать факт наличия отказа, предсказание остаточного ресурса осуществляется статистическими методами. Автоматизированные системы контроля тепловизионных полей на действующих металлургических предприятиях РФ не выявлены.

Системы контактного охлаждения широко используются в технологических контурах металлургических машин. Это системы вторичного охлаждения МНЛЗ и системы термообработки труб и заготовок.

Рассмотрим функционирование системы контактного охлаждения на примере зон вторичного охлаждения заготовки за кристаллизатором. Поскольку толщина корки в этой зоне еще незначительна, то охлаждение здесь в значительной степени влияет на качество заготовки [22,23,24]. От организации охлаждения зависит формирование трещин, осевая пористость. Интенсивность охлаждения влияет на изменение формы заготовки. Система охлаждения включает в себя непосредственно устройства охлаждения и элементы, поддерживающие заготовку. Известны системы водяного охлаждения, охлаждения водовоздушной смесью, сухого охлаждения, охлаждения жидкими металлами и солями, последние пока распространения не получили [15]. Наиболее часто используются схемы охлаждения с подачей распыленного теплоносителя на заготовку между поддерживающими роликами, а также схемы подачи теплоносителя непосредственно на ролик. Известны схемы охлаждения с

подачей охлаждающей жидкости через ролики поддержки [15]. Значительное влияние на интенсивность образования усадочных трещин оказывает интенсивность теплоотдачи. Так, использование струйных систем охлаждения с коэффициентами теплоотдачи 2300-2900 Вт/м²К приводило к внутренним напряжениям при усадке слоев корки и, в итоге, к расслоению материала при прокатке. Снижение коэффициента теплоотдачи до 220-250 Вт/м²К, по данным работы [14], позволило удерживать металл в пластичном состоянии по всему сечению заготовки и снимало возможность возникновения трещин.

При струйном охлаждении в качестве теплоносителя используется техническая вода, подаваемая в виде распыленной струи из механических форсунок на поверхность охлаждения. Так как температуры охлаждаемых поверхностей весьма значительны (от 300 до 1000°С), то на поверхностях, как правило, наблюдается паровая рубашка, что затрудняет теплоотдачу. Для достижения эффективного отвода тепла капли жидкости должны обладать кинетической энергией, достаточной для преодоления паровой зоны и испарения непосредственно на поверхности охлаждения (рисунок 1.10). Интенсивность теплообмена при струйной схеме охлаждения зависит от температуры охлаждаемой поверхности, от размера и скорости капель, от ориентации форсунок относительно поверхности. При этом вследствие наличия «кризиса кипения» на поверхности интенсивность теплоотдачи нелинейно зависит от расхода жидкости, а избыточная кинетическая энергия струи может вызывать недопустимое локальное переохлаждение материала. Несмотря на эти особенности, струйное охлаждение часто применяют на сортовых МНЛЗ непосредственно за зоной кристаллизатора.

Водовоздушное охлаждение реализуется подачей на охлаждаемую поверхность двухфазной газожидкостной среды [25]. Система двухкомпонентных газожидкостных форсунок позволяет увеличить дисперсность распыления воды и обеспечить требуемую интенсивность равномерного охлаждения большей поверхности при меньшем расходе воды.

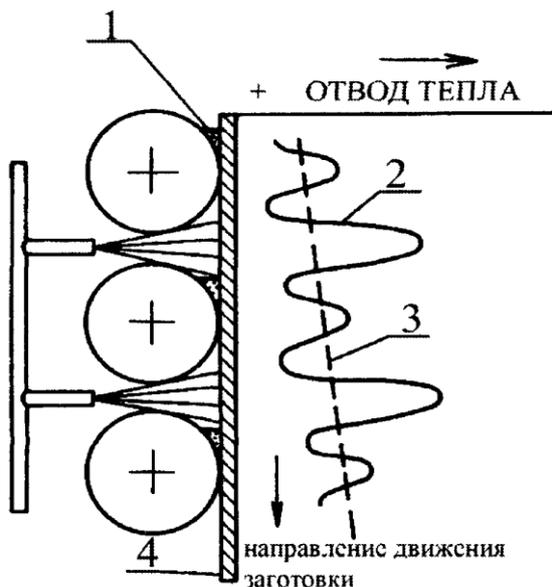


Рисунок 1.10 – Схема интенсивности отвода тепла:

1 – зона охлаждения роликами; 2 и 3 – интенсивность отвода тепла действительная и усредненная соответственно; 4 – заготовка

Немаловажно и постоянство конуса распыла двухфазных форсунок при широком изменении параметров расходов и давлений как газовой, так и жидкостной среды. Высокая гомогенность распыла снижает вероятность локальных перегревов и переохлаждений зоны металла.

При использовании системы струйного охлаждения неравномерность подачи охлаждающей жидкости при термообработке трубных заготовок может вызвать коробление последних (рисунок 1.11).

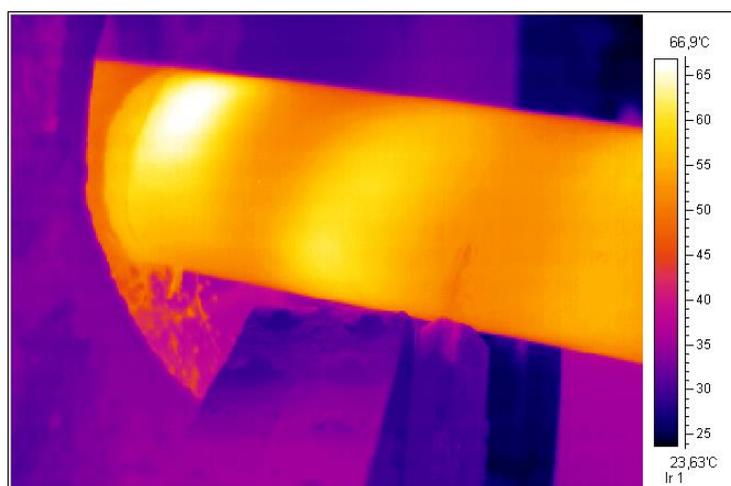


Рисунок 1.11 – Неравномерность температур при струйном охлаждении заготовки

При тепловизионной съемке установлено наличие зон температурные градиентов в обрабатываемой заготовке в местах недостаточного охлаждения вследствие неудачного подбора режимов подачи жидкости. Несмотря на совершенство расчетов охлаждающих элементов, проблема диагностического определения состояния и эффективности работы системы контактного охлаждения существует [25]. Это связано с возможностью изменения состояния распылителей и подводящих магистралей при эксплуатации, с изменениями геометрии коллекторов подвода и вязкости жидкой среды и положения форсунок. Использование в этих случаях системы контроля термических полей самой заготовки представляется актуальным, а использование системы регулирования отдельных контуров охлаждения по параметрам температурные полей заготовки позволит повысить качество заготовки при снижении затрат. Опыт использования систем охлаждения [26, 27] указывает на необходимость непрерывного контроля полей температур поверхностей теплообмена.

1.6 Проблемы оценки состояния существующего теплогенерирующего оборудования металлургических комплексов на примере тупиковых горелок

Системой нагрева печей является совокупность горелочных устройств или нагревателей, устройств подачи топлива и воздуха для горения, систем эвакуации продуктов сгорания и утилизации их тепла. Цель разработки системы нагрева печи – обеспечить тепловой, температурный и аэродинамический режимы, необходимые для оптимального проведения технологического процесса, для которого предназначена печь, а также максимальную экономичность работы агрегата и удобство его эксплуатации. Горелочные устройства являются важнейшим элементом систем нагрева любого металлургического агрегата. Правильная настройка горелочного устройства, рациональная установка его на агрегате, соблюдение условий эксплуатации решающим образом влияют на эффективность и экономичность, а иногда на работоспособность всего агрегата. Следует отметить, что работа собственно горелки во многом определяется

конструкцией и работой ряда смежных узлов и элементов: горелочного туннеля, систем розжига и контроля факела, управления подачей топлива и окислителя, системы безопасности. Так, при модернизации газодинамической системы генерации тепла печи необходимо опираться на целый ряд исходных положений и специальных требований. При этом необходимо выбрать и рассчитать:

- тип, характеристику, число и расположение в печи горелочных устройств или нагревателей;
- характер движения продуктов сгорания или атмосфер контролируемого состава в рабочем пространстве печи и в случае необходимости устройства для организации циркуляции этих газовых сред;
- способ подачи воздуха для горения и уборки продуктов сгорания, схемы разводки топлива и воздуха для горения;
- температуры подогрева топлива и воздуха для горения;
- тип, размеры и характеристику теплоутилизационных устройств (рекуператоров или регенераторов).

Решения всех этих вопросов тесно взаимосвязаны. Например, при применении инжекционных горелок необходима установка блочного керамического рекуператора с целью подогрева воздуха для горения. Это диктуется тем, что такой рекуператор имеет самое низкое сопротивление по воздушному пути и поэтому чрезмерного повышения давления газа перед горелкой не потребуется [28, 29]. При нагреве в атмосфере контролируемого состава необходимо применять радиационные трубы. Если конструкции и настройка инжекционных горелок достаточно отработаны, то радиационные трубы, сочетающие непосредственно горелку и излучающее устройство, критичны как к настройке режимов работы, так и к конструкции. Определенную сложность вызывает работа с керамическими блоками таких устройств. Классический подход с регулировкой в процессе пуска наладочных работ оказывается зачастую неприемлемым по причине невозможности изменения размеров керамических элементов излучателей и туб в процессе регулировки. Из вышеизложенного материала следует, что основной проблемой этого типа

горелочных устройств является разработка методов настройки и диагностики путём моделирования протекающих процессов.

1.7 Анализ диагностирования гидравлических систем силовых приводов металлургических агрегатов

В металлургии Российской Федерации и ряде стран ближнего зарубежья на сегодняшний день наблюдается ситуация, когда, с одной стороны, возрастает доля современного сложного и дорогого оборудования ведущих мировых производителей, с другой, резко возрастают издержки, вызванные отказами этого оборудования. Современные металлургические агрегаты нельзя представить без гидравлических приводов самого разного назначения. Это и системы наклона электродуговых печей, системы противоизгиба валков прокатных станов, гидравлические системы прошивных станов, системы гидроабразивной резки, а также многочисленные вспомогательные привода и устройства позиционирования. Сложность ситуации усугубляется наличием на предприятиях одновременно функционирующих нескольких поколений гидравлической техники, требующих высокой квалификации ремонтного и обслуживающего персонала. Кроме того, преобладающей тенденцией в последние годы стал переход на цифровые системы управления, что требует от специалистов по наладке системы управления достаточно высокого уровня знаний о процессах, протекающих в гидравлических системах, и наоборот, сотрудники, ответственные за ремонт современного гидравлического оборудования, вынуждены становиться специалистами в области систем управления.

Несмотря на схожесть основных параметров гидравлических систем различного назначения, гидравлические привода металлургических агрегатов имеют ряд принципиальных особенностей, а их эксплуатация связана со специфическими воздействиями. В первую очередь, это значительные тепловые воздействия, импульсные воздействия высокого давления, специальные рабочие жидкости и агрессивные среды. Общим для всей этой техники является использование электрогидравлических систем с рабочим давлением до 60 МПа и дросселирующих распределителей с зазорами гильз золотника от 2 до 15 мкм. На

ряде технических объектов применяются системы с импульсным повышением давления до 150 МПа.

Кроме того, одной из тенденций развития современных технических систем является миниатюризация [30], как правило, сопровождаемая скачкообразным ростом параметров. Так, системы гидроэкструзии, применяемые для обработки сверхтвердых материалов, имеют пиковое давление до 1000 МПа, современные топливные системы имеют давление впрыска компонентов свыше 100 МПа, системы 20-15-летней давности имели аналогичный параметр порядка 10-15 МПа, современные системы гидроабразивной резки металлов функционируют при давлениях до 220 МПа. Широко применяются системы получения порошковых материалов с помощью технологии гидродинамического воздействия двухфазных струй, выбрасываемых под давлением до 500 МПа. Аналогичная ситуация возникает в машиностроительной и специализированной гидравлике с устойчивым ростом давлений до 150 МПа.

Не менее актуально и то, что при увеличении производительности металлургических агрегатов возрастают и скорости переключения гидравлических систем, достигая 200 Гц и более. При значительных перемещаемых массах приводов в этом случае наблюдаются значительные (до 60-70 МПа) скачки давлений от инерционной нагрузки.

Даже беглый анализ используемого гидравлического оборудования металлургических предприятий показывает, что применение находят гидравлические аппараты разных принципов управления и разных поколений разработки.

Основными параметрами, по которым осуществляется диагностирование гидроприводов металлургических агрегатов и в целом гидромашин,

являются:

- продолжительность рабочего цикла;
- объемный КПД (утечки рабочей жидкости);
- амплитуда пульсаций давления;
- параметры виброударной характеристики;

- уровень шума;
- максимальное развиваемое давление;
- установившаяся температура рабочей жидкости;
- установившаяся температура корпусных деталей;
- интенсивность нагрева;
- эффективная (гидравлическая) мощность;
- концентрация продуктов износа и абразива в рабочей жидкости;
- интенсивность нарастания или снижения давления;
- степень разрежения во всасывающей гидролинии;
- частота вращения ротора;
- характер изменения частоты вращения ротора;
- усилие сопротивления перемещению исполнительного органа;
- перепад давления;
- время перемещения штока на задаваемую длину;
- усадка штока за задаваемый интервал времени;
- давление срабатывания;
- тормозной путь исполнительного органа;
- степень засоренности фильтров;
- параметры состояния рабочей жидкости (вязкость, наличие воды, кислотное число и др.).

Многие из них являются производными (расчетными) от некоторого ряда поддающихся измерению параметров функционирования гидроприводов. К числу наиболее характерных из регистрируемых параметров диагностирования можно отнести:

- давление рабочей жидкости; перепад (разность) давлений;
- разрежение;
- пульсации давления;
- расход рабочей жидкости;
- уровень жидкости в баке;

- температуру жидкости;
- температуру корпусных деталей;
- время; перемещение линейное;
- перемещение угловое;
- положение подвижных элементов;
- частоту вращения ротора;
- усилие;
- крутящий момент;
- уровень шума;
- виброударные характеристики;
- параметры рабочей жидкости.

Большинство из этих параметров требует использования специального диагностического оборудования, ведения статистики изменения диагностируемых параметров, анализа факторов, приводящих к изменению параметров гидравлических систем. Проанализировав типовые отказы гидравлических систем металлургического оборудования, можно сделать вывод, что примерно 35% причин отказов приходится на утечки в гидрооборудовании, 11% – на нарушение регулировок, 15% – на загрязненное масло, 5% – на механические разрушения и остальные 34% – на потерю подвижности элементов, абразивный износ и т.д. [30,31-34]

Потеря работоспособности изделия может происходить как вследствие выхода какого-либо параметра за пределы допустимых величин, так и вследствие нарушения функционирования изделия или его элементов (заклинивание золотника, зависание клапана и т.д. [35,30]). В этой связи все отказы можно классифицировать на параметрические и функциональные. Изменение параметров гидропривода в эксплуатации происходит обратимо и необратимо. Обратимые изменения возникают при действии внешних факторов и исчезают после прекращения их действия. Необратимые изменения, связанные, например, с накоплением повреждений в элементах гидропривода, сохраняются и после прекращения действия внешних факторов. К постепенным параметрическим

отказам могут приводить лишь необратимые изменения, связанные с постепенным износом, старением элементов гидропривода.

Примерами таких отказов могут служить увеличение проседания выходного звена под нагрузкой и ухудшение динамических свойств из-за износа золотниковой пары распределителя либо снижение скорости выходного звена из-за износа насоса и т.д. Внешнюю негерметичность по уплотнению выходного звена гидропривода также можно отнести к постепенным параметрическим отказам.

К внезапным параметрическим отказам приводят как обратимые, так и необратимые изменения, например, мгновенное частичное засорение дросселя или сопла электрогидравлического усилителя, заклинивание золотника управления и т.д. К постепенным функциональным отказам приводят обычно необратимые изменения, связанные, как правило, с накоплением усталостных повреждений в элементах гидропривода. Внезапные функциональные отказы могут быть связаны со статическим разрушением силовых элементов из-за появления нерасчетной нагрузки, с разрушением дефектных элементов, с внезапным заклиниванием золотников и т.д.

По стабильности внезапные отказы можно разделить на устойчивые и перемежающиеся. Перемежающиеся отказы («сбои») являются нестабильными и после возникновения отказа при одних и тех же условиях и воздействующих сигналах могут исчезать, а затем возникать вновь.

Устойчивые отказы после их возникновения не исчезают самопроизвольно при неизменных условиях внешнего воздействия, но при повторном действии эти отказы вновь появляются. Можно отметить, что постепенные отказы в большинстве случаев являются устойчивыми.

Все отказы гидропривода классифицируются на контролируемые и неконтролируемые. Контролируемые отказы выявляются обслуживающим технику персоналом в процессе ее эксплуатации или при периодическом проведении специальных проверок агрегатов в составе изделия. Неконтролируемые отказы представляют наиболее сложный для контроля вид

отказов. На основе аналитических расчетов и имеющейся статистической информации с определенной вероятностью можно прогнозировать момент возникновения постепенного отказа. Примером прогнозируемых отказов могут служить ресурс насосов, герметичность уплотнений и т.д.

Но при этом необходимо учитывать не только временной, но и стоимостный фактор, так как обследование оборудования различными диагностическими приборами требует различных затрат [27]. Отказы гидравлических систем можно разделить на отказы источников давления, распределительной аппаратуры, транспортных магистралей, рабочих органов. Эти отказы сами распределены неравномерно, а отказы рабочих органов часто связаны с механическими повреждениями штоков и гильз гидроцилиндров. Отказы, связанные с абразивным износом, характерны для уплотнительных устройств, шарниров, золотниковых пар. Повреждения гильз, штоков вызваны, как правило, адгезионным износом, определяемым изменением рабочих свойств жидкости при критических температурах. Для определения остаточного ресурса гидравлических аппаратов, учитывая значительную долю отказов, связанную с потерей подвижности плунжерных и золотниковых пар расчетным путем, необходима математическая модель движения рабочих сред с учетом изменения характеристик среды, а именно локального изменения характеристик среды, особенно в зоне малых зазоров.

Кроме того, ряд отказов и неисправностей современного гидравлического оборудования металлургических комплексов может быть устранен или компенсирован различными способами. Так, например, неисправности дросселирующих распределителей, связанные с эрозионным и абразивным износами, в определенной степени могут быть скорректированы на начальных стадиях системой управления.

При анализе отказов гидросистем фиксировали практически все виды износов (абразивный, адгезионный, окислительный, кавитационный) элементов гидрооборудования [36]. Причем, если некоторые отказы были связаны с нарушениями правил эксплуатации гидроприводов, с повышенным содержанием

абразивных частиц, с нарушением процедур запуска гидросистем при низких температурах, с механическими повреждениями, то значительная часть отказов прямо или косвенно была связана с поведением рабочей жидкости. Анализ показал, что нельзя сводить проблему только к отслеживанию вязкости рабочей среды и ее загрязнению, значительное влияние оказывают и пиковые давления в рабочих системах [36]. Отслеживанию изменения состояния рабочей жидкости в этих условиях уделяется недостаточное внимание. Принимают во внимание показатели вязкости, кислотного числа, обводнения, как правило, при температурах среды 40-50°C. Износ на четырех шариковых машинах трения исследуют также в зоне положительных температур, эффекты облитерации и химической стабильности оценивают при рабочих давлениях, исследования при пиковых давлениях не производят. Несмотря на то, что методики оценки состояния гидравлических систем по наличию продуктов износа в пробах хорошо известны по работам Башты Т.М., Алексеевой Т.В., Кельша Х.Р., связь продуктов износа с процессами, протекающими в рабочих жидкостях при экстремальных температурах и высоких давлениях, на сегодняшний день изучена недостаточно. Так, работ посвящённых влиянию на параметры гидравлических систем управления металлургических машин загрязнения рабочих сред оксидами железа, характерных только для этого класса оборудования, не выявлено. Вопросы поведения рабочих жидкостей при высоких давлениях, близких к давлениям фазовых переходов, остаются весьма востребованными, причем их нельзя рассматривать отдельно от элементов металлургического оборудования, где используются эти системы.

Несмотря на огромный объем исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными, ряд вопросов, возникающих при эксплуатации машин, остается недостаточно изученными. Так, процессы, протекающие в зонах граничных слоев смазок и металлических поверхностей при возможности локальных фазовых переходов в рабочих жидкостях при импульсном повышении давления не изучены, а также влияние намагниченности плунжерных пар на эффекты облитерации и интенсификации износов изучены недостаточно, что

делает актуальными работы в этом направлении. Без этих данных невозможно осуществлять качественное диагностирование установок, подбор рабочих жидкостей и режимов эксплуатации. Значительной проблемой является и отсутствие специализированного диагностического оборудования для исследования реологических характеристик и химической стабильности жидкости при высоких давлениях. Существующее оборудование позволяет измерять вязкость при повышенных давлениях для фиксированных значений скорости сдвига, определение полной кривой вязкости на серийных ротационных вискозиметрах возможно при давлениях не более 10 МПа. Серийное оборудование для оценки поведения жидкости в малых зазорах при давлениях выше 150 МПа не выпускается. Вопросы комплексного развития методов тепловизионной диагностики гидрооборудования, диагностики по состоянию рабочих жидкостей, по оценке токового потребления с точки зрения прогнозирования отказов металлургических машин и агрегатов остаются открытыми.

1.8 Анализ подходов к моделированию теплогидравлических процессов в высоконагруженных системах металлургических машин

Одним из перспективных направлений в оценке состояния теплогидравлических аппаратов является моделирование процессов. Наиболее перспективным методом является локализация выявляемых дефектов путём моделирования процессов, протекающих в агрегатах, используя в качестве граничных условий поверхностные температурные поля. Системы моделирования процессов теплопроводности в твёрдых телах хорошо отработаны и отражены в работах [38-47]. Если решение задачи распространения тепла в конструкциях достаточно хорошо проработаны, то в задачах теплообмена с границей раздела фаз учитываются далеко не все факторы движения жидких сред, характерные как для существующего металлургического оборудования. Моделирование течения и тепломассообмена как в каналах, так и в щелевых зазорах интенсивно

развивается [48,49]. Анализируя современное состояние теоретических исследований [50-58], можно отметить, что исторически сложилось разделение по направлениям изучения состояния жидкости теплогидравлических систем в больших объемах и изучения поведения жидкости в граничных слоях. Единого подхода, у этих школ исследователей, к поведению жидких сред нет.

Одним из перспективных методов считается метод прямого численного моделирования, основанный на численном решении нестационарных уравнений Навье-Стокса при условии последующего осреднения результатов по времени или по координатам пространства [54].

Традиционно сложился подход, при котором дискретная молекулярная структура игнорируется и движущая среда рассматривается как «сплошная среда» [46,59]. Само понятие "сплошная среда" тесно связано с понятием "вязкость", для отдельных молекул понятие "вязкость" физического смысла не имеет. Вязкость также теряет физический смысл, когда размеры потока меньше размеров свободного пробега молекул. На основе изложенного, ряд авторов рассматривает *вязкость* как «проводимость количества движения между отдельными зонами движущегося потока» [49,53]. Такое представление вязкости является общим независимо от того, какие частицы – молекулы или более крупные образования – являются носителями количества движения между точками движущегося потока. При ламинарном движении количество движения между отдельными точками переносится молекулами, а при турбулентном движении – турбулентными зонами, возникающими из-за беспорядочного «пульсирующего», «вихревого» движения потока. При этом масштабы турбулентных вихрей изменяются от максимальной величины, сопоставимой с размерами потока, до минимальной, определяемой молекулярной вязкостью [60 - 62]. Как правило, турбулентная среда также рассматривается как сплошная и на нее распространяются все свойства, присущие сплошной среде. Ряд авторов [46, 48], придерживающихся данного подхода, предполагает наличие в турбулентной среде своей "вязкости", отличной от молекулярной вязкости. Если молекулярная вязкость предопределяется молекулярными особенностями среды и проявляет себя только

при относительном движении отдельных слоев потока [70], то турбулентная вязкость предопределяется молярным движением "турбулентных частиц", имеет место и проявляет себя только при турбулентном движении потока [63,64]. Так как особенности турбулентного движения в первую очередь характеризуются числом Рейнольдса, то турбулентная вязкость, вероятно, также может предопределяться числом Рейнольдса [71-75]. Зависимость турбулентной вязкости от самого движения требует того, чтобы она была переменной в пределах потока.

В зазорах, характерных для золотников и плунжерных систем, данный режим практически не реализуется, но в опорах скольжения он возможен, а в теплообменных устройствах и каналах гидроаппаратов он является преобладающим. Для рассмотрения турбулентного режима весьма часто используют методы на основе решений уравнений пограничного слоя [60,76,77]. Для замыкания кажущихся турбулентных напряжений и тепловых потоков обычно принимается та или иная модель турбулентности [78]. Модели турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса ряд авторов [60,78] подразделяет на три группы, причем ряд моделей способны производить расчет поведения как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей, правда, для конкретных, достаточно ограниченных условий [60,80,81,82]. Причем отдельно выделяют модели турбулентной вязкости, где применяется в том или ином виде гипотеза, выдвинутая более 100 лет назад Буссинеском о связи кажущихся турбулентных сдвиговых напряжений со скоростью средней деформации через так называемую «турбулентную вязкость» [65]. Причем здесь можно выделить простейшие алгебраические модели, модели с одним обыкновенным дифференциальным уравнением, модели с несколькими дополнительными уравнениями в частных производных, которые необходимо решать для получения параметров модели [66,78].

Получили развитие и распространение модели, основанные на использовании понятия рейнольдсовых напряжений. Для последних моделей

характерно отсутствие предположения о пропорциональности средней скорости деформаций и турбулентных напряжений [78,84].

В ряде простейших случаев качественно верные результаты могут быть получены при использовании алгебраических моделей турбулентности [86]. Как правило, данные модели представляют собой различные алгебраические зависимости для определения турбулентной вязкости [78].

Такие модели, как модели Прандтля, Шлихтинга, Хинце, Тринг и Либби, Ферри, Блюма и Стейгера, Шеца, Льпиниери представляют собой обобщенные и скорректированные для конкретных случаев, более подробное описание этих моделей можно найти в работах [78 - 80, 83].

Общим недостатком приведенных алгебраических моделей турбулентности является невозможность определения влияния на структуру турбулентности со стороны потока, находящегося выше по течению [80]. Последнее связано с тем, что алгебраические модели дают оценку локальных параметров. Кроме того, для учета специфических эффектов приходится менять константы в рассматриваемых моделях, что затрудняет возможность их использования для прогнозирования характеристик сложных течений. Стремление создания более общих моделей турбулентности позволяет увеличить точность расчётов процессов протекающих в частности в высоконагруженных опорах и теплообменниках металлургических агрегатов и является основной целью при разработке более точных моделей движения жидких сред [28, 78, 86,87,89].

Наиболее распространены модели, где решаются уравнения переноса не для длины пути смещения, а для параметра, связанного с длиной турбулентности; к таким относится E-ε-модель, где ε – скорость диссипации турбулентности. Для замыкания системы уравнений используется уравнение переноса для ε вида:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial E}{\partial y} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon, \quad (1.1)$$

где турбулентная вязкость

$$\mu_t = \frac{G_u \rho E^2}{\varepsilon}. \quad (1.2)$$

В работах, посвященных данному вопросу, рассматривается много аналогичных моделей [74, 78, 38-41]. Можно выделить модели Нага–Сполдинга, Уилкокса–Трейси. Как правило, данные модели отличаются методом представления диффузионного члена. В ряде случаев применяют модели, содержащие три, а иногда и больше дифференциальных уравнений переноса.

В качестве инструмента для исследования внутренней структуры турбулентности также применяются модели, где изначально не предполагается выполнение условия пропорциональности напряжений и средней скорости деформаций [47]. В этих моделях отсутствуют ограничения, накладываемые применением гипотезы Буссинеска. В то же время данные модели содержат наибольшее количество уравнений и констант, что позволяет в ряде случаев более достоверно описывать процессы, происходящие в каналах при наложении усложняющих расчет воздействий. Однако при использовании этих моделей сохраняется необходимость введения допущений для моделирования отдельных членов [28]. Более полный обзор подходов к замыканию уравнений Рейнольдса можно найти в работах [38-40, 78, 45].

С этих позиций гораздо более предпочтительными выглядят дифференциальные модели турбулентности. Именно эти модели использовались автором при моделировании течения рабочих сред в каналах. Незначительно отличаясь по сложности численной реализации от градиентных моделей, последние, как правило, обладают большей универсальностью, в том числе и за счет учета большего количества эффектов, а также за счет большей, чем в градиентных моделях, варьировемости величин. Значительное число работ по исследованию турбулентных течений с использованием данных моделей указывает на возможность успешного описания турбулентных характеристик в достаточно сложных течениях, в том числе не автомодельных [40]. Основные идеи, заложенные в большинство дифференциальных моделей, основанных на использовании уравнений переноса для характеристик турбулентного течения,

таких как E – энергия турбулентности, L – масштаб турбулентности, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, τ – турбулентное трение, ν_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости (μ_t – динамический коэффициент турбулентной вязкости) выдвинуты в работах Колмогорова А.Н., Прандтля Л., Невзглядова В.Г., Бредшоу П. [78,80]. Одна из наиболее удачных $E - L$ моделей является модель Глушко Г.С. Именно эту модель с учетом коррекции коэффициентов и изменением метода задания вязкости автор работы успешно использовал при проведении исследований [92,136].

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(u_x \frac{\partial E}{\partial x} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_1 \mu_t) \frac{\partial E}{\partial y} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial E}{\partial y} \right)^2 - \frac{c_2 (\mu + c_1 \mu_t)}{L^2} E \\ \rho \left(u_x \frac{\partial L}{\partial x} + u_y \frac{\partial L}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_3 \mu_t) \frac{\partial L}{\partial y} \right] - c_4 \frac{L}{E} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \\ &+ B c_5 \sqrt{E} \rho \left[1 - \frac{L}{(R-r)^2} \right] - \rho c_6 L \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\mu_t}{\mu} &= \alpha Re_t \left[1 - \exp(\delta_2 Re_t^2) + \delta_3 \sqrt{Re_t} \exp(\delta_1 Re_t^2) \right] \end{aligned} \right. ; \quad (1.3)$$

$$Re_t = \frac{\rho \sqrt{EL}}{\mu};$$

$$B = c_6 + \frac{c_7}{Re_t}.$$

Несмотря на высокую универсальность модели Глушко Г.С. для повышения точности расчётов требуется корректировка коэффициентов. Кроме последней в различное время были предложены модели Бредшоу П., Приходько В.П. Тестовые расчёты, проведённые автором для условий высоконагруженных агрегатов, не показали значительных преимуществ моделей Бредшоу П, Приходько В.П..

Ряд авторов [40, 92,93-96], использующих $E-\varepsilon$ -модели, применяют их различные модификации для описания течения, как правило, в зависимости от величины критерия Рейнольдса. Учитывая, что в высоконагруженных теплогидравлических системах наиболее часто реализуются режимы течения

рабочих сред при $Re < 50000$, использование моделей этого типа не всегда оправдано.

Существующее на сегодняшний день огромное разнообразие моделей турбулентности и их модификаций достаточно полно отражено в работах [78, 38, 39, 40, 94-108, 110-117, 140], но и для них характерно отсутствие учета изменения вязкостных характеристик вещества при изменении давления в рассматриваемых зонах [85, 88, 118-123, 141] что необходимо учитывать при решении задач моделирования процессов в высоконагруженном оборудовании.

Вязкость смазочных масел и рабочих жидкостей гидропривода сильно меняется с повышением давления. При изменении давления от 1 до 1000 атм она меняется в 8-40 раз. При давлениях в несколько тысяч атм многие вязкие масла превращаются в псевдопластичные вещества. Согласно измерениям Хайда [83], Герси [84] и Кискальта [84], Б.А. Григорьева [67] и многих других [61, 75, 76, 85], зависимость вязкости от давления у разных масел может сильно различаться, но, как правило, она всегда выше, чем у низших углеводородов и легких нефтепродуктов. Исследования Хайда [83] показали, что вязкость минеральных масел более чувствительна к давлению, чем вязкость растительных масел. Иллюстрацией влияния давления на вязкость масел могут служить данные Дау (таблица 1.4) [84]. Варбург, Фукс [68] и некоторые другие исследователи отмечают, что при давлении ниже 700-800 атм зависимость вязкости от давления близка к линейной.

М. П. Воларович [67] показал (таблица 1.4), что исследованные им отечественные вязкие смазочные масла при давлении до 100 МПа с достаточным приближением подчиняются логарифмической зависимости вида

$$\log \eta_p = a + bp. \quad (1.4)$$

Постоянные a и b зависят от природы масла и температуры (таблица 1.5).

Необходимо отметить, что в литературе не удалось обнаружить исчерпывающие данные по характеристикам всех углеводородов, используемых в

металлургии. По этой причине разработка методов расчетного определения вязкости весьма востребована.

Учет зависимости вязкости от давления важен для анализа работы плунжерных пар и золотников в гидромашинах. Хорошо изучены температурные зависимости вязкости для практически значимых углеводородов [87-91] и по этому не являются предметом исследования в данной работе.

Таблица 1.4 – Свойства масел

Давление, кГ/см ²	Вязкость масла, сантипуаз						
	пенсиль- ванского	оклахом- ского	калифор- нийского	пенсиль- ванского	оклахом- ского	пенсиль- ванского	оклахом- ского
	при температуре, °С						
	98,9			54,4		37,8	
1	7	10	13	41	43	83	94
141	10	14	17	60	66	106	145
281	15	18	21	73	85	145	209
422	19	22	25	91	102	198	293
563	22	27	30	111	131	268	405
703	25	33	37	143	170	357	557
985	36	50	55	249	318	654	1060
1270	52	71	90	408	564	1100	1940
1550	73	104	153	663	940	1830	—
1830	103	154	260	1030	1500	—	—
2110	145	219	408	1660	2840	—	—
2390	202	314	655	2460	—	—	—
2670	387	454	1080	—	—	—	—
2960	393	654	1790	—	—	—	—
3240	535	890	2890	—	—	—	—
3520	732	1150	—	—	—	—	—
3800	973	1430	—	—	—	—	—

Таблица 1.5 – Значения a и b (по М.П. Воларовичу) для смазочных масел

Масло	Температура, °С	a	$b \cdot 10^4$
Автол 18	20	1,017	5,83
	45	0,176	5,44
Брайтстюк	32	0,813	7,87
	60	0,243	7,77
Машинное масло	33	0,041	9,21
	40	-0,125	7,95

Вязкость как функция давления проявляет степенную зависимость, но с обратным эффектом: свободный объем между молекулами понижается при повышении давления [92]. Следовательно, при повышении давления вязкость также повышается. В общем случае эффект влияния давления на вязкость описывается уравнением Баруса:

$$\eta_{0p} = \eta_{0np} e^{\beta p}, \quad (1.5)$$

где η_{0np} – вязкость при нулевом сдвиге при атмосферном давлении, p – давление, β – коэффициент, учитывающий свойства материала; $e^{\beta p}$ – поправочный коэффициент.

При температуре, близкой к точке фазового перехода, влияние давления становится определяющим. При повышении давления может возникнуть кристаллизация, обусловленная затвердеванием материала при температуре, отличной от температуры кристаллизации при атмосферном давлении, что также вызывает сильное, часто скачкообразное повышение вязкости что ограничивает применение рабочих сред в аппаратах металлургического комплекса.

Согласно уравнению А. И. Бачинского качественно верно описывающего поведение рабочей среды, вязкость является функцией удельного объема и при сжатии под давлением растет значительно быстрее. При 1000-1200 МПа объем жидкостей уменьшается на 2-26%, однако вязкость при этом возрастает в десятки и сотни раз.

До давления 200МПа Бертшнайдер [67] рекомендует формулу Андраде:

$$\frac{\mu_p}{\mu_1} = \left(\frac{v_1}{v_p} \right)^{1/6} \left(\frac{\beta_{1S}}{\beta_{pS}} \right)^{1/2} e^{\frac{C(v_1 - v_p)}{T v_1 v_p}}, \quad (1.6)$$

μ_p и μ_1 – вязкость жидкости под избыточным p и атмосферным давлением соответственно;

v_p и v_1 – удельный объем жидкости под избыточным p и атмосферным давлением соответственно;

β_{pS} и β_{1S} – адиабатические коэффициенты сжимаемости под избыточным давлением p и атмосферным соответственно;

C – постоянная;

T – абсолютная температура.

При давлениях свыше 100 МПа данная зависимость не дает верных результатов.

Б.А.Григорьев рекомендует вычислять вязкость при давлениях p до 70 МПа и температурах до 493 К по уравнению Манстона:

$$\log\left(\frac{\nu}{\nu_T}\right) = 0,142p(0,0239 + 0,762\nu_T^{0,278}), \quad (1.7)$$

где ν_T – коэффициент кинематической вязкости при атмосферном давлении.

Среднее значение погрешности во всей области применимости, по мнению автора формулы, не превышает 8%. При давлении менее 35 МПа средняя погрешность уменьшается до 5%.

В.Геллер [84], произведя обработку экспериментальных данных о вязкости в рамках принципа соответственных состояний, получил зависимость

$$\frac{\eta_T}{\eta_{\tau=1}} = \sum_{i=0}^6 a_i \bar{\tau}^i, \quad (1.8)$$

где $a_0 = 3,2210$; $a_1 = -6,9997$; $a_2 = -5,3701$; $a_3 = 22,132$; $a_4 = 13,913$;

$a_5 = 0,7040$; $a_6 = 1,2149$; $\bar{\tau} = \frac{T}{0,7T_C}$.

По данным работы [74] зависимость 1.7 не характеризует особенности поведения нефтепродукта в интересующих режимах нагружения.

В. Геллер, Запорожин, Роткоп [84] для описания коэффициента динамической вязкости жидких нефтепродуктов на линии насыщения предлагают соотношения:

$$\ln \eta_S = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \frac{a_{ij} A^j}{\tau^i}; \quad (1.9)$$

$$\bar{\tau} = \sum_{i=0}^5 a_i \eta_*^{-i} + \bar{\pi} \sum_{i=0}^{55} b_i \eta_*^{-i}; \quad (1.10)$$

$$\bar{\pi} = \frac{P}{0,7 p_C}; \quad (1.11)$$

$$\eta_* = \frac{\eta}{\eta_{0,7}}. \quad (1.12)$$

Значения коэффициентов a_i и b_i приведены в таблице 1.6.

Б.А. Григорьев оценивает точность приведенной зависимости (1.10) в 4-9%.

Проверка методов расчета вязкости под давлением, проведенная авторами работы [67, 85], показывает, что полученные в работе [68] результаты дают погрешности расчета вязкости прямогонных нефтепродуктов порядка 8-15%, для продуктов вторичной переработки они возрастают до 30% и более.

Таблица 1.6 – Коэффициенты a_i и b_i

I	a_i	b_i	i	a_i	b_i
0	0,39296	0,01649	3	0,76154	-0,00927
1	-1,31886	-0,02981	4	-0,24242	0,00091
2	1,38281	0,02723	5	0,02012	0,00008

Исследования А.Н. Панченкова [83], основывающиеся на относительно простой модели строения жидкости, привели к результатам, которые смогли найти применение в технических расчетах. Для расчёта вязкости Панченков рекомендовал формулу:

$$\mu = 3\sqrt{6R^3} \sqrt{\frac{v_M^2}{N_0}} M^{-5/6} \rho^{4/3} T^{1/2} f_s e^{E/RT} (1 - e^{-E/RT})^2, \quad (1.13)$$

где R – газовая постоянная; v_M – объем молекул в одном моле; N_0 – число Авогадро; E – энергия связей молекул жидкости, рассчитанная по теплоте испарения в пустоте; f_s – вероятностный коэффициент. При $f_s = 1$, результаты расчета дают качественно верную картину зависимости вязкости жидкости от температуры, но значения вязкости не согласуются с результатами измерений.

При $f_s = e^{\Delta S'/R}$, где $\Delta S'$ – изменение энтропии при образовании одной связи (в расчете на один моль), А.Н. Панченков предложил формулу для расчета этого значения:

$$\Delta S' = -\frac{L_{исп} N_0}{q} - \frac{N_0 (S_{ид} - S_{нас})}{q}, \quad (1.14)$$

где $L_{исп}$ – теплота испарения жидкости при температуре T ;

q – общее число связей в одном моле жидкости;

$S_{ид}$ и $S_{нас}$ – энтропия моля вещества в состоянии идеального газа и в состоянии насыщенного пара.

При этом допущении расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными, погрешность составляет от доли до нескольких процентов [83].

Недостатком зависимости А.Н. Панченкова является известность параметров входящих в неё величин только для ряда простых веществ, при ограничениях на параметры давления до 10 МПа. Применение зависимости А.Н. Панченкова для решения задачи моделирования процессов характерных для высоконагруженных узлов металлургического оборудования, таких как опоры скольжения при граничных режимах смазки, гидравлическое оборудование при пиковых давлениях среды до 200 МПа, механизмов притивоизгиба валков требует определения параметров среды в этих условиях воздействий. Необходимо определение зависимости плотности от давления среды, характерного размера межмолекулярных расстояний, энергии взаимодействия молекул жидкости. Спецификой работы металлургического оборудования, а именно установок МНЛЗ, станов горячей прокатки, прошивных станов, станов автоматов и вспомогательного оборудования является высокий уровень загрязнённости воздушной среды окислами железа. Повышенная концентрация окислов железа в рабочих средах гидравлических приводов металлургических агрегатов вызвана износом и несовершенством уплотняющих узлов. Этот вид загрязнений сказывается как на быстродействии элементов гидравлического оборудования, так

и на его ресурсе. Отсутствуют данные по влиянию этого вида загрязнений на параметры рабочей жидкости, что оказывает влияние на точность прогнозов при диагностике.

Анализируя подходы к моделированию теплогидравлических процессов в высоконагруженных системах металлургических машин необходимо отметить, что, не смотря на значительные успехи в этой области ряд задач необходимых для решения проблемы моделирования в процессе комплексной диагностики не решены. В частности для наиболее универсальной $E - L$ модели течения жидкости не скорректированы коэффициенты для течения сред в зазорах характерных для металлургического оборудования. Отсутствуют данные по изменению объёмной вязкости применяемых в металлургических аппаратах рабочих сред до давлений в 200 МПа. Не учитывается специфика теплогидравлических и механических систем металлургического оборудования, где основным внешним загрязнителем являются оксиды железа.

1.9. Выводы по главе 1 и постановка задач исследования

1. Анализ имеющейся информации свидетельствует о необходимости базирования комплексного подхода к диагностированию технических объектов на оценке существующих методов оценки состояния оборудования.
2. Опыт применения систем диагностирования показал необходимость учёта индивидуальных наборов критических параметров меняющимся при эксплуатации для элементов теплозащиты, систем разлива жидкого металла, систем охлаждения, гидравлических систем, теплогенерирующего оборудования.
3. Анализируя подходы к моделированию теплогидравлических процессов в высоконагруженных системах металлургических машин отмечено, что, не смотря на значительные успехи в этой области ряд задач необходимых для решения проблемы моделирования в процессе комплексной диагностики не реализован. В частности для наиболее универсальной $E - L$ модели течения жидкости не скорректированы коэффициенты для течения сред в зазорах характерных для металлургического оборудования.

4. Отсутствуют данные по изменению объёмной вязкости применяемых в металлургических аппаратах рабочих сред до давлений в 200 МПа.
5. Не учитывается специфика теплогидравлических и механических систем металлургического оборудования, где основным внешним загрязнителем являются оксиды железа.
6. 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 температурных полей практически не разработана.
7. Вопросы комплексного развития методов тепловизионной диагностики, диагностики по состоянию рабочих жидкостей, по оценке токового потребления с точки зрения прогнозирования отказов металлургических машин и агрегатов остаются открытыми. Исходя из вышеизложенного, сформулированы цель и задачи исследования.

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, повышения эффективности оценки состояния оборудования.

Целью работы является научное обоснование 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 методiku 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.

Глава 2 Развитие научных основ диагностирования металлургического оборудования

Анализ литературных источников, приведённый в первой главе, показал, что комплексные методы первичной диагностики и оценки остаточного ресурса разработаны недостаточно. Существующие диагностическое оборудование – как интегрированное, так и внешнее по отношению к обследуемому объекту, несмотря на высокую стоимость диагностирования, может дать достоверную информацию о текущем состоянии практически любого технического объекта.

Стратегия обоснования методов диагностирования металлургического оборудования представлена на рисунке 2.1

Но огромное экономическое значение имеют методы первичной диагностики. Имея невысокую стоимость требуемого диагностического оборудования, малое время оценки состояния, эти методы позволяют с определённой вероятностью выявления дефектов проводить диагностирование металлургических агрегатов без остановки оборудования. Но отсутствие должного научного обоснования снижает эффективность этих методов. Одной из составляющих стратегии научного обоснования является формализация процессов диагностирования включающая алгоритм проведения диагностирования как первичного и углублённого уровня, так и подбор диагностического оборудования.

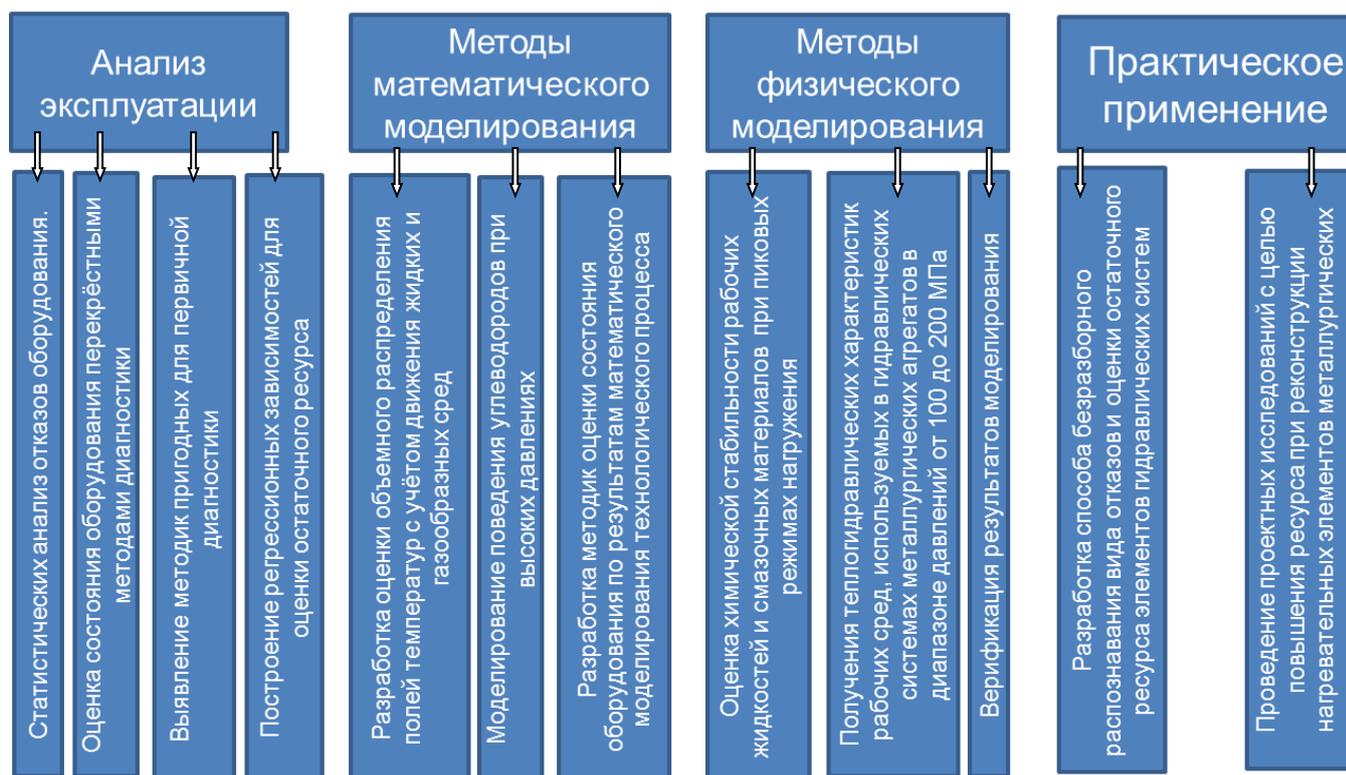


Рисунок 2.1 Стратегия научного обоснования методов диагностики

Рассматривая вопросы диагностики оборудования, необходимо разделять процедуры диагностики по глубине обследования оборудования. Под методологией диагностирования понимается совокупность методик применяемых при анализе состояния оборудования. Наиболее проблемной составляющей диагностики является первичная диагностика оборудования. Одной из стадий

разработки научного развития первичной диагностики, является формирование алгоритма проведения процедур диагностирования. Предлагаемая автором последовательность прохождения процедур представлена на рисунке 2.2.

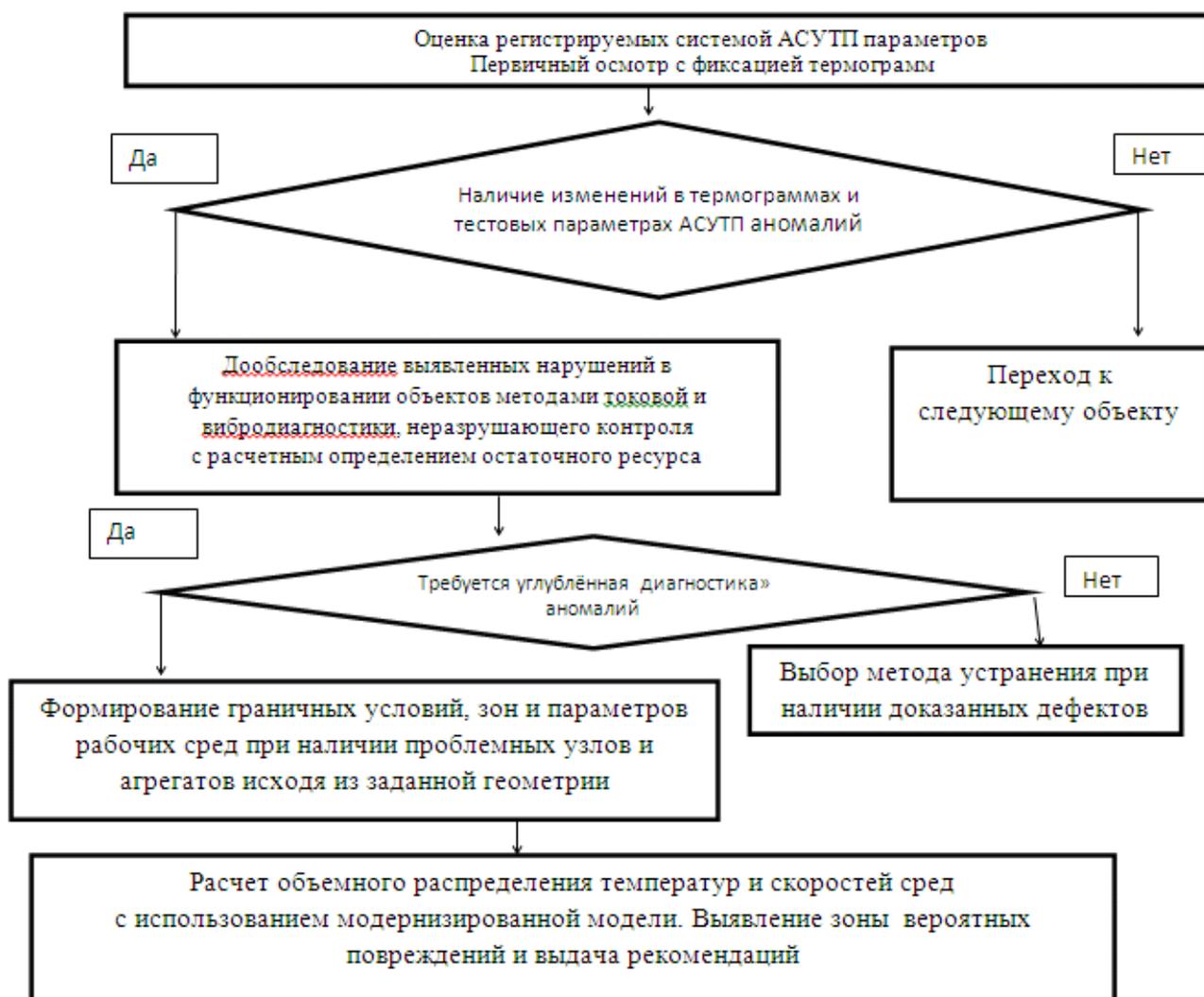


Рисунок 2.2 – Предложенный автором алгоритм первичной диагностики

В состав комплекса для диагностики, как правило, включают оборудование, позволяющее контролировать (путем забора проб или текущего контроля) состояние рабочей жидкости, ее расход, системы контроля давления, вибраций, системы определения толщины и состояния оболочек конструкций, температурный режим. Имея специалистов, прошедших универсальную подготовку, и набор диагностического оборудования, возможно проведение весьма широкого комплекса диагностических работ в сжатые промежутки времени. В создавшейся экономической ситуации предприятиям может оказаться выгодным подход, при котором производится формализованное определение

состояния оборудования с автоматизированной передачей данных в единый центр управления.

Это позволяет одной группе лиц проводить комплексное исследование тепловых, силовых и энергетических систем, позволяющее определять текущее состояние металлургического оборудования. Экономически эффективным является проведение диагностических мероприятий без остановки оборудования и перевода его в тестовый режим. Использование портативных диагностических комплексов с каналом передачи данных в АСУТП в этих условиях оказывается весьма эффективным. Такой подход позволяет автоматизировано корректировать режимы работы оборудования предотвращая функциональные отказы.

Именно развитие научных основ первичной диагностики высоконагруженного оборудования является одним из методов повышения экономической эффективности производства. Оценим достоинства и недостатки диагностических методов и схем, а также зоны их применимости. Рассмотрение методик диагностики начнем с анализа факторов и процессов, вызывающих отказы оборудования.

2.1 Развитие методики оценки износа оборудования

В процессе эксплуатации техническое состояние изделий неизбежно меняется, в частности, детали изнашиваются, изменяются их начальные размеры и геометрическая форма, вследствие чего в механических устройствах нарушаются посадки в сопряжениях, уменьшается механическая прочность деталей и сборочных единиц в результате изменения начальных размеров и усталости материала, возникают усталостные трещины и деформация, изменяются структура и физико-химические свойства неметаллических материалов (пластмассы, резины, текстиля), разрушаются защитные покрытия (электролитические, химические и лакокрасочные). Причинами изменения технического состояния изделий и их составных частей в процессе эксплуатации могут быть также дефекты послеаварийного характера.

Учитывая то, что влияние разных видов износа на состояние оборудования не одинаково в процессе эксплуатации и оценка состояния оборудования по методикам фиксирующим ту или иную составляющую износа на каждом временном срезе даст разные величины остаточного ресурса необходимо производить оценку состояния на каждом временном срезе по нескольким параметрам с расчётным определением наихудшего времени остаточного ресурса.

Основными факторами, влияющими на значение нормального износа, являются удельное давление и относительная скорость движения трущихся деталей. Традиционно в процессе износа выделяют три стадии:

- приработка, когда изменяется микро- и макроструктура поверхностей и имеет место уменьшение скорости износа;
- нормальный износ, когда можно принять линейную связь между значением износа и временем;
- прогрессивный износ, когда имеет место возрастание скорости износа.

Изменение характера нагрузки способно не только изменять длительность стадий износа, но и приводить к скачкообразному изменению скорости износа [27, 124]. Износ может также изменить характеристики системы, что влияет на параметры конструкции.

Хотя износ оборудования является естественным, но нежелательным событием, предупреждение его и устранение в условиях эксплуатации техники обычно связаны с определенными сложностями [125].

Для оценки остаточного ресурса применяют регрессионные зависимости, получаемые анализом превалирующих диагностических параметров. Проводя диагностические мероприятия через определенные временные интервалы, методами математической статистики оценивали вид распределения определяющего фактора и рассчитывали величину отклонения δ , в диапазоне которого находился с требуемым значением вероятности искомый параметр (рисунок 2.2).

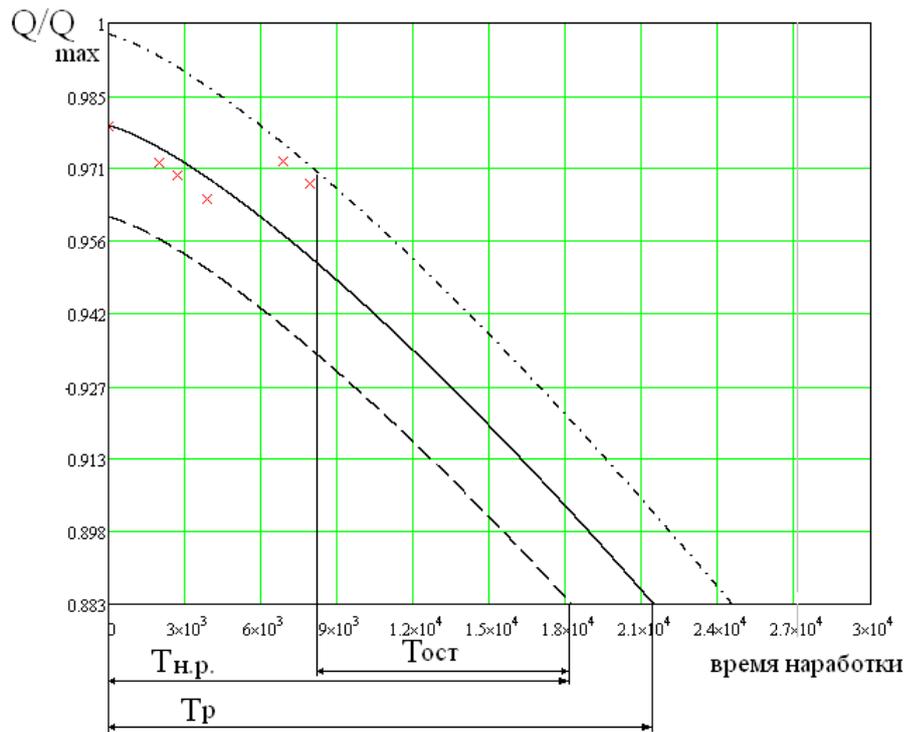


Рисунок 2.2 – Оценка остаточного ресурса агрегата:

1 – данные диагностики; 2 – расчетная кривая

Проведя ряд серий определения величины базового для системы параметра, строилась регрессионная зависимость искомого фактора от времени и оценивалась зона границы диапазона, при котором базовый фактор с требуемой вероятностью достигал предельных для эксплуатации системы значений. Таким образом, определяли T_p – наиболее вероятное время отказа, $T_{нр}$ – время отсутствия отказа с заданной вероятностью и величину остаточного ресурса $T_{ост}$.

Установленные закономерности износа систем определяются в виде :

$$x(t) = vt^\alpha + \Delta x_{сл} + \Delta x_n, \quad (2.1)$$

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 к каждому виду оборудования по истории его изменения [35]. Так как скорости износа оборудования меняются при изменении режима нагружения, то коэффициенты зависимости 2.1 меняются при

эксплуатации оборудования. Авторы работ [35] принимали значения коэффициентов регрессии постоянными после достижения определённого количества диагностируемых мероприятий. В условиях переменной нагрузки такой подход представляется неправомерным. Более информативным является подход, при котором данная процедура производится для каждого используемого метода диагностики с оценкой вероятного времени отказа при каждом акте диагностирования. С целью повышения точности оценки остаточного ресурса автором предложен подход, позволяющий за счёт корректировки на каждом временном шаге оценивать величину остаточного ресурса исходя из реального состояния оборудования. Учитывая неравнозначность различных факторов изменения состояния оборудования на каждом временном срезе рассматривалось несколько контролируемых параметров, и оценка минимального остаточного ресурса осуществлялась по худшему на данном временном срезе параметру. Решение задачи определения коэффициентов для реологических зависимостей определялось в среде прикладного математического пакета Mathcad.

Разработанный автором программный код позволяет считывать массив данных как записанный на носитель системой АЦП так и введённый в ручном режиме. Нахождение коэффициентов регрессии осуществлялось путём решения системы уравнений с использованием встроенных функций «pwrfit». На рисунке 2.3 приведён пример участка программного кода нахождения коэффициентов регрессии.

Поскольку определение исходных данных с датчиков анализа состояния объектов всегда обладает определёнными систематическими и случайными погрешностями, производилась статистическая обработка с определением вероятности нахождения в кривых отказов в заданных интервалах.



Рисунок 2.3 Схема нахождения коэффициентов регрессии

Для оценки среднеквадратичного отклонения и показателя точности выборки и диапазона отклонений при заданной вероятности безотказной работы также использовался прикладной математический пакета Mathcad (см. рис. 2.4).

Для оценки времени вывода объекта из эксплуатации, а также для организации планирования закупа запасных частей необходимо знать не наиболее вероятное время отказа, а временной промежуток безаварийной работы с заданной вероятностью. Значение вероятности безаварийной работы назначается, исходя из класса и категории оборудования.

$$Q_{cr} := \frac{\sum_{i=0}^{25} Q_{n_i}}{26} \quad Q_{cr1} := \frac{\sum_{i=0}^4 Q_{1_i}}{5} \quad Q_{cr2} := \frac{\sum_{i=0}^6 Q_{2_i}}{7} \quad Q_{cr3} := \frac{\sum_{i=0}^3 Q_{3_i}}{4} \quad Q_{cr4} := \frac{\sum_{i=0}^2 Q_{4_i}}{3} \quad Q_{cr5} := \frac{\left(\sum_{i=0}^6 Q_{5_i} \right)}{7}$$

Нахождение среднего

$Q_{cr} = 58.762 \quad Q_{cr1} = 58.32 \quad Q_{cr2} = 58.171 \quad Q_{cr3} = 57.875 \quad Q_{cr4} = 57.333 \quad Q_{cr5} = 57.5$



$$D1 := \frac{\sum_{i=0}^4 (Q_{cr1} - Q_{1_i})^2}{5} \quad D2 := \frac{\sum_{i=0}^6 (Q_{cr2} - Q_{2_i})^2}{7} \quad D3 := \frac{\sum_{i=0}^3 (Q_{cr3} - Q_{3_i})^2}{4} \quad D4 := \frac{\sum_{i=0}^2 (Q_{cr4} - Q_{4_i})^2}{3}$$

$$D5 := \frac{\sum_{i=0}^6 (Q_{cr5} - Q_{5_i})^2}{7} \quad D := \frac{\sum_{i=0}^{25} (Q_{cr} - Q_{n_i})^2}{26}$$

Нахождение дисперсии

$D3 = 0.107 \quad D1 = 0.33 \quad D2 = 0.771 \quad D4 = 0.222 \quad D5 = 0.291 \quad D = 0.615$



$$\sigma := \sqrt{D} \quad \sigma_1 := \sqrt{D1} \quad \sigma_2 := \sqrt{D2} \quad \sigma_3 := \sqrt{D3} \quad \sigma_4 := \sqrt{D4} \quad \sigma_5 := \sqrt{D5}$$

$\sigma = 0.784 \quad \sigma_1 = 0.574 \quad \sigma_2 = 0.878 \quad \sigma_3 = 0.327 \quad \sigma_4 = 0.471 \quad \sigma_5 = 0.54$

$$\sigma_{cr} := \frac{\sigma + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5}{6}$$

Нахождение среднеквадратичного

Определение показателя точности выборки

$\sigma_{cr} = 0.596 \quad \eta := \frac{0.707}{\sigma_{cr}} \quad \eta = 1.187$

Рисунок 2.4 Схема нахождения дисперсии среднеквадратичного отклонения и показателя точности выборки

Наиболее часто эти ограничения предельного времени эксплуатации связаны с устойчивостью системы электрогидравлического управления конкретным видом металлургического оборудования, условиями прогрессирующего износа, приводящего к функциональному отказу оборудования или усталостным разрушением конструкции. В частности для гидравлического усилителя системы противоизгиба валков вероятность безаварийной работы составляет 0.995.

Величина отклонения контролируемого параметра при нормальном характере распределения выборки находится с использованием встроенных в математический пакет *Mathcad* функций *Given* и *Find* (см. рис. 2.5). Данные математические функции обеспечивают решение нелинейных уравнений и систем.



Рисунок 2.5 Элемент программного кода нахождения отклонения контролируемого параметра при принятом значении вероятности 0.995

Представленная методика была применена для оценки остаточного ресурса аксиально поршневых насосов гидравлической системы наклона электродуговой печи ОАО «ПНТЗ». Были определены зависимости износа насосов при меняющемся факторе загрязнения рабочей жидкости. Полученные данные приведены в разделе 6.1.

Предложенный вариант оценки остаточного ресурса позволяет увеличить точность расчёта остаточного ресурса и с учётом формализации процессов интегрировать разработанные алгоритмы в цифровую систему управления производством.

Таким образом, разработан один из элементов методики позволяющий формализовать подход к оценке остаточного ресурса.

2.2 **Совершенствование методики диагностики металлургического оборудования на основе оценки температурные поля систем в условиях эксплуатации**

Оценка состояния оборудования по внешним тепловым полям основана на регистрации изменений распределения температур контролируемых объектов и применима к объектам из любых конструкционных материалов. Предлагаемая методика пригодна как для оборудования с пассивным тепловым полем или собственным излучением (на объект не воздействуют внешним источником энергии), так и при применении активного теплового воздействия (объект нагревают или охлаждают от внешнего источника). Измеряемым информативным параметром при диагностировании служит температура или тепловой поток.

При проведении мероприятий диагностирования футеровки доменных и мартеновских печей, мест утечки теплоты в зданиях, участков электроцепей и блоков управления с повышенным нагревом, трещин в силовых конструкциях измеряют тепловые потоки или температурные поля работающих объектов с целью определения неисправностей, проявляющихся в виде мест повышенного нагрева.

При диагностировании участков с плохой теплопроводностью в многослойных панелях теплозащиты металлургических агрегатов обычно нагревают и измеряют температуру или тепловой поток с одной из сторон. Это позволяет обнаруживать несплошности (трещины, пористость, инородные включения) в объектах, изменения в структуре и физико-химических свойствах материалов по изменению теплопроводности, теплоемкости, коэффициенту теплоотдачи. Таким способом выявляют неплотное прилегание слоев и дефекты обнаруживают участки повышенного или пониженного нагрева поверхности панели. Измерения температур или тепловых потоков по разработанной методике выполняют бесконтактным способом. Анализ применения показал, что средством бесконтактного наблюдения, регистрации температурных полей и тепловых потоков является сканирующий тепловизор.

Тепловизионная диагностика состоит из двух уровней. При первичном диагностировании наиболее часто применяется первый. При этом оцениваются тепловые аномалии. Анализ аномалий и дефектов – является наиболее ответственной частью и в сложных случаях требует высокой квалификации. На этом этапе проводят интерпретацию снимков, определяют температуры объектов и по результатам тепловизионной съемки сравнивают с нормативными температурами или тепловыми полями, устанавливают причину потерь, отклонения температур от нормы.

Как уже отмечалась ранее, метод контроля оборудования по температурным полям не нов и достаточно часто используется при диагностике металлургического оборудования [126-128]. Для относительно простых случаев, таких как контроль состояния опор (рисунок 2.6) или качества защитной футеровки (рисунок 2.7) этого бывает достаточно.

Предложенная методика предназначена для выявления дефектов в сложных случаях. В сложных случаях, когда тело имеет составную конструкцию или внутри объекта наблюдается движение жидких или газообразных сред, простого анализа наружных температурных полей становится явно недостаточно. Повысить достоверность качества диагностики элементов металлургического оборудования при снижении ее стоимости позволяет комплексная диагностика с использованием в качестве методов предварительной диагностики системы оценки состояния оборудования по расчету параметров на основе анализа температурных полей наиболее критического оборудования. Для решения этой задачи предложена методика оценки состояния объекта, позволяющая определять распределение температурных полей.

Эта методика [15,129] основана на том, что процесс теплообмена происходит через многослойную стенку из материала с известной теплопроводностью при граничных условиях, характеризуемых рассчитываемым или постоянным коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду и изменяющейся температурой исследуемой среды внутри аппарата.

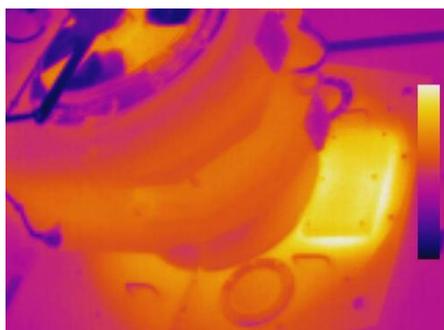


Рисунок 2.6 – Температурные поля опоры валка прокатного стана



Рисунок 2.7 – Проверка состояния футеровки

При наличии охлаждающего контура или движения жидкости дополнительно учитываются параметры и этого процесса. Используемые эмпирические методы расчета дают точность определения интенсивности передачи тепла в диапазоне 15-20%, что не обеспечивает требуемой точности расчётов. Повысить достоверность качества диагностики элементов металлургического оборудования при снижении ее стоимости может позволить комплексная диагностика с использованием в качестве методов предварительной диагностики системы оценки состояния оборудования по расчету параметров на основе анализа температурных полей наиболее критического оборудования. Отличие предложенной методики заключается в определении параметров теплообмена на границе жидкость (газ) твёрдая стенка путём моделирования процесса движения среды в каналах агрегатов. Зная коэффициент теплопроводности материала корпуса, его зависимость от температуры, а в ряде случаев и от давления, начальное распределение температур в установке, геометрию аппарата, рассчитываются температурные поля по толщине аппарата в любой момент времени. Такой подход позволяет определять время стабилизации температуры, получать значения изменения температуры жидкой среды на границе внутренней поверхности корпуса, как на этапе стабилизации, так и при движении жидкости в той или иной зоне системы. Кроме того, одновременно решается задача определения количества тепла, проходящего через зоны стенки. Особенностью такого подхода является высокая тепловая инерционность

процесса распространения тепла в корпусе аппарата. Подход требует высокой точности определения температур, не ниже десятых долей градуса, чтобы оценить температуру исследуемой среды с точностью до градуса.

Для решения этой задачи требуется математическая модель, позволяющая определять интенсивность передачи тепла с учетом возможных локальных фазовых переходов (кристаллизации) контактирующей жидкой среды.

Процесс теплопереноса в этих условиях описывается классическим дифференциальным уравнением теплопроводности [130, 131,132,133]:

$$c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.2)$$

где c_p – теплоемкость; ρ – плотность как функция материала температуры и давления; τ – время; λ – теплопроводность как функция материала температуры; t – температура. Но для значительного количества технически значимых случаев бывает достаточно одномерной постановки.

Стадии исследуемого процесса охватывают промежутки времени, характеризующиеся критерием Фурье

$$F_0 = \frac{a \tau_0}{l^2} \leq 0,55, \quad (2.3)$$

где a – коэффициент температуропроводности, l_0 – характерный линейный размер тела, τ_0 – характерное время изменения внешних условий.

Чтобы упростить решение этого уравнения, принимаются следующие допущения:

- потери тепла с боковой части поверхности корпуса аппарата отсутствуют;
- распределение температуры по объему в начальный момент времени и в поперечном сечении для любого момента времени принимается равномерным;
- тепловое сопротивление контакта отсутствует;
- стенка аппарата цилиндрическая, многослойная.

Интенсивность передачи тепла устанавливается на основании скоростей рабочих сред и локальных температур сред полученных методом моделирования. Параметры материала и свойства теплоносителей, такие как теплопроводность, теплоёмкость считаются зависимыми от температуры. Так как при анализе реальных объектов получение полных полей интенсивности теплоотдачи затруднено, то допускается процедура усреднения.

Для осесимметричной задачи зачастую бывает достаточно решения в цилиндрической системе координат. Система уравнений в этом случае может быть представлена в классическом варианте:

$$\begin{cases} (1-s)\rho_k c_k \frac{\partial t_k}{\partial \tau} = \alpha(T-t) + \lambda_{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial t}{\partial R} \right) \\ (-s)uc_2 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_v(T-t) \end{cases} \quad (2.4)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tau = 0; t = t(x, R); R = 0; \frac{\partial t}{\partial R} = 0; T = T_2; \\ x = H; \frac{\partial t}{\partial x} = 0; R = R_n; k = (t - t_0) = \lambda_{\varepsilon} \frac{\partial t}{\partial R}, \end{aligned}$$

где α_v – приведенный коэффициент теплоотдачи как функция температуры; s – параметр направления теплового потока; ρ_k и c_k – плотность и теплоемкость материала с коррекцией на температуру; λ_{ε} – теплопроводность материала; c_2 – теплоемкость газа на границе; k – коэффициент теплоотдачи окружающей среде; R и R_n – соответственно текущий и наружный радиусы; H – высота; t – температура материала; u – скорость теплоносителя; t_0 – температура окружающей среды; T – температура теплоносителя, T_2 – температура теплоносителя на границе; τ – время.

Учитывая перечисленные допущения, решение дифференциального уравнения теплопроводности принимает вид:

$$t = A + Bx + C \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}} e^{-\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}} d\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right), \quad (2.5)$$

где A, B, C – константы интегрирования.

Постоянная интегрирования A определяется для условий $x = 0$ и для начального момента времени из уравнения: $t = t_{x=0} = A$.

При $\tau = 0$ уравнение теплопроводности принимает вид:

$$t = A + Bx + C, \quad (2.5)$$

из которого следует, что $B = 0$, так как $t_n = const$, а $C = t_n - t_{x=0}$.

Более сложные случаи предусматривали решение в конечно разностной форме.

Решение задачи в этом случае 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 от реальной температуры объекта корректируется толщина теплоизоляции и расчет повторяется до достижения требуемой точности.

Из предварительных экспериментов было установлено, что для оценки температуры во объёму тела с точностью до градуса необходимо определение температуры внешней поверхности объектов при помощи тепловизора с разрешающей способностью $0,08^\circ\text{C}$. Полученные при этом термограммы является граничным условием для проведения расчета.

Диагностирование элементов конструкции металлургического оборудования по предложенной методике с использованием моделей движения сред интегрированных в программный пакет AnsysCFX при давлениях сред до 50 МПа позволяла определять и локализовать зоны дефектов. При параметрах среды по давлению свыше 50 МПа Существующие модели оценки теплогидравлических параметров течения, как показал численный эксперимент, не способны достоверно описывать поведение рабочих сред в этих условиях. В приложении Б приведены результаты моделирования эпюр скорости глицерина в зазоре между вращающимися цилиндрами, выполненного в пакете AnsysCFX. Расчет проводили для условий нагружения гидростатическим давлением 100 и 300 МПа соответственно. Данные свидетельствуют о том, что при давлениях свыше 300 МПа и комнатной температуре глицерин переходит в кристаллическое

состояние, кроме того, результаты натурального эксперимента указывают на наличие релаксации вязкости непосредственно после нагружения гидростатическим давлением. Полученные на немодернизированных моделях AnsisCFX результаты показали, что изменение состояния среды, как и изменение вязкости от давления при моделировании, не учитывается, тем более не учитываются граничные эффекты, возникающие в граничных слоях при повышении давления (см. приложение 1). Таким образом, наиболее современные математические модели, используемые в программных комплексах COSMOSFloWorks и Ansis, не способны без коррекции учитывать эффекты, происходящие в углеводородах при высоких давлениях и в условиях динамического нагружения высоким давлением.

2.3 Эффективность использования разработанных методов комплексной диагностики в металлургии

Под показателем эффективности использования методов диагностики в данной работе понимается отношение затрат на проведение диагностических мероприятий с использованием существующих сертифицированных методик, к затратам при применении разработанной методики комплексной первичной диагностики с коррекцией на вероятность выявляемых дефектов.

Высокий показатель эффективности при низкой стоимости диагностики при высоком уровне информативности и универсальности при контроле состояния широкого спектра оборудования имеет метод анализа температурные поля. Его применение в комплексе методов вибрационной диагностики, оценки акустических колебаний, анализа тестовых сигналов, анализа продуктов износа повышает уровень достоверности прогнозов.

Методика комплексной первичной диагностики (рисунок 2.2) была успешно применена при оценке состояния оборудования цеха № 4 Первоуральского новотрубного завода (ОАО «ПНТЗ») и при обследовании оборудования прокатного цеха Уральской стали (Новотроицк). Применяли комплексную диагностику по оценке температурные поля с расчетом распределения температур в объеме наиболее ответственного оборудования,

вибродиагностику, токовую диагностику, оценку загрязнений и химической стабильности рабочих сред. Наиболее низкую стоимость диагностики при высокой вероятности выявления дефектов (не хуже 0,67) и минимальных временных затратах продемонстрировали тепловизионные системы (данные комплексной диагностики оборудования цеха №4 ОАО «ПНТЗ»). Большие временные затраты и более высокая стоимость диагностики, но при большей (0,72) вероятности выявления дефектов продемонстрировали вибродиагностические методы. Методы оценки состояния агрегатов по анализу состояния рабочих жидкостей и смазок спектрометрическим методом при максимальной стоимости исследования дали минимальное время надежного предсказания. Применяемые методы контроля по токовому сигналу, по реакции механизмов, ультразвуковой контроль использовались выборочно и давали промежуточные результаты. Наибольшую эффективность удалось достичь при тепловизионном методе контроля как предварительном с последующим уточнением методами виброакустической и токовой диагностики.

Для определения коэффициента эффективности требуется нахождение себестоимости проведения диагностических мероприятий. Типовой объём выполняемых при диагностировании мероприятий включает анализ технической документации на диагностируемый объект, визуальный контроль состояний агрегатов, непосредственно проведение диагностических мероприятий, анализ результатов диагностирования и оценку остаточного ресурса объекта, подготовку технического заключения.

Себестоимость работы по техническому диагностированию металлургического оборудования, включает: стоимость используемых материалов; заработную плату диагностов; отчисления из фонда заработной платы; стоимость электроэнергии; накладные расходы; прочие расходы. При определении стоимости материалов, электроэнергии используемых в процессе диагностирования применяют действующие цены и закладывают обоснованные объёмы расходования. Расчёт фонда заработной платы осуществляется на основе анализа реальных затрат времени или по нормативам

времени на проведение диагностических мероприятий с учётом часовой тарифной ставки диагностов.

Так согласно [134] нормы времени работ по анализу документации на единицу оборудования составляют 0,8 человеко-часа, на анализ аварийных ситуаций выделяется 1.8 человеко-часа, на оценку остаточного ресурса выделяется 8 человеко-часов, на подготовку технического заключения 10 человеко-часов. Данные затраты времени является общими как для комплексной диагностики, так и для диагностирования методами анализа вибраций, температурные поля, токовыми методами, акустическими методами и при использовании оценки состояния оборудования путём анализа состояния рабочих жидкостей.

Анализ реальных затрат времени непосредственно на проведение мероприятий по диагностированию металлургического оборудования методами анализа внешних температурные поля показал средние затраты времени на одну единицу оборудования в размере 0.75 человеко-часа. Причём в состав работ входила подготовка и настройка прибора, снятие распределения внешних полей температур, фиксация результатов замеров, анализ результатов термографирования.

Необходимо учитывать, что норма времени в человеко-часах на выполнение работ при техническом диагностировании оборудования должна учитывать подготовительные работы, время на отдых и личные надобности. Расчёт нормы времени производился по формуле:

$$НВ = ВД (1 + К_{пд.з.} + К_о.) \quad (2.6)$$

Где: НВ . – нормы времени выполнения диагностических работ, чел.-ч;
 ВД. – время выполнения диагностических работ, чел.-ч;
 К_{пд.з.} - коэффициент учёта времени затрачиваемого на подготовительно-заключительные работы и обслуживание рабочего места (оценивается путём фиксации времени выполнения работ), К_{пд.з.} = 0,07;

Ко. - коэффициент учёта времени затрачиваемого на личные надобности и отдых и в соответствии с методическими рекомендациями «Определение нормативов на отдых и личные надобности» [134], Ко. = 0,1.

В качестве примера приведём данные затрат времени проведения диагностических мероприятий методами контроля вибрации в соответствии с рекомендациями [134]. На проведение диагностических измерений по расширенной программе на одну единицу оборудования отводится 10 человеко-часов, на спектральный анализ вибрации (на обработку результатов измерений) выделяется 10 человеко-часов, на анализ полученных данных отводится 8.1 человеко-часа.

Стоимость комплекса работ при техническом диагностировании (СТк) оборудования определялась по приведённой формуле:

$$\text{СТк} = (\Sigma \text{Сд} \cdot \text{Qр} \cdot \text{Кус.}) \cdot \text{Ктр.} \cdot \text{Кр.к.} + \text{П}, \quad (2.7)$$

где Сд - себестоимость соответствующей работы при оценке технического состояния металлургического оборудования, Qр - фактический объем соответствующей работы по диагностированию объекта. П - плановая прибыль, составляющая 25 % от себестоимости работ руб., Кр.к.=1 — поправочный коэффициент, к заработной плате учитывающий регион выполнения работ, Кус =1 — поправочный коэффициент учитывающий условия выполнения работ, Ктр.=1— поправочный коэффициент учитывающий транспортные расходы.

$$\Sigma \text{Сд} = \text{С1} + \text{С2} + \text{С3} + \text{С4}$$

Где С1 затраты на работу с технической документацией.

$$\text{С1} = \text{Са.т.д.} + \text{Сав.с.} + \text{Ст.з.}$$

Са.т.д. – затраты анализу документации на единицу оборудования согласно [] приняты равными 121.02 руб.; затраты на анализ аварийных ситуаций приняты равными 237.52 руб.; затраты на оценку остаточного ресурса приняты равными 1029.95 руб.; затраты на подготовку технического заключения оценены в 1465,81 руб. на единицу оборудования.

$$\text{С1} = 121.02 + 237.52 + 1029.95 + 1465.81 = 2854.3$$

C2 - затраты на проведение диагностических измерений; C3 - затраты на обработку результатов измерений; C4 - на анализ полученных данных.

Затраты на проведение диагностических мероприятий для ряда использованных методов диагностики приведены в таблице

Таблица 2.1 Затраты на проведение диагностических мероприятий

	Вибродиагностика	анализ внешних температурные полей	анализ токовых сигналов	Анализ рабочих жидкостей
затраты на работу с технической документацией	2854,3	2854,3	2854,3	2854,3
затраты на проведение диагностических измерений	1350,03	600	351,01	2245,45
затраты на обработку результатов измерений	1080,02		540,01	1080,02
анализ полученных данных	1093,53		546,7	1093,53
Итого	6377,88		3454,3	4292,02

Анализ затрат времени на диагностирование единицы металлургического оборудования различными методами оценки состояния агрегатов приводится в таблице 2.2. Расчёт временных затрат приведённый в таблице 2.2 производился с учётом методических рекомендаций приведённых в «единых нормах времени расценках на техническое диагностирование» а также с использованием анализа затрат времени на техническое диагностирование при проведении работ по

оценке состояния оборудования цеха № 4 Первоуральского новотрубного завода (ОАО «ПНТЗ») и при обследовании оборудования прокатного цеха Уральской стали (Новотроицк).

Таблица 2.2 Затраты времени на проведение диагностических мероприятий

	вибродиагностика	анализ внешних температурных полей	анализ токовых сигналов	Анализ рабочих жидкостей
Затраты времени на работу с технической документацией	20,6	20,6	20,6	20,6
затраты времени на проведение диагностических измерений	10	0,75	7	4
Затраты времени на обработку результатов измерений	10		5	10
Затраты времени на анализ полученных данных	8,1		8,1	8,1
Итого	48,7	21,35	40,7	42,7
нормы времени	56,98	24,98	47,62	49,96

Анализ таблиц показывает двукратное уменьшение требуемых затрат времени на диагностику с использованием температурные поля по сравнению с другими видами диагностических мероприятий при более низкой стоимости диагностических мероприятий.

Для оценки эффективности применяемых методов оценки технического состояния необходимо рассмотреть вопрос вероятности выявления дефектов при

проведении диагностических мероприятий. При проведении мероприятий по диагностированию состояния металлургического оборудования проводился учёт статистики подтверждённых и не подтверждённых контрольными разборками оборудования и отказами дефектов. По соотношению выявленных аномалий и подтверждённых при контроле дефектов делался вывод о вероятности установления верного диагноза оценки состояния оборудования. Диагностические мероприятия производились одной группой диагностов, что исключило необходимость введения поправки на разную вероятность выявления дефектов при различной квалификации персонала. Диагностические мероприятия производились с интервалом в месяц. Данные о вероятности выявления дефектов приводятся в таблице 2.3

Таблица 2.3 Вероятность выявления дефектов

Месяцы до контрольной ревизии механизмов	вибродиагностика	анализ внешних температурных полей	анализ токовых сигналов	анализ рабочих жидкостей
5	0,2	0,1	0	0,03
4	0,49	0,35	0,1	0,05
3	0,72	0,67	0,4	0,2
2	0,92	0,86	0,605	0,41
1	0,93	0,9	0,74	0,8

При проведении исследований был определён коэффициент эффективности диагностических мероприятий методам комплексной первичной диагностирования с использованием метода анализа внешних температурные полей. Полученный коэффициент эффективности сравнивался с наиболее эффективным из сертифицированных методов, методом вибродиагностики. Результаты расчёта

коэффициента эффективности диагностических мероприятий от времени диагностирования приведены на рисунке 2.8.

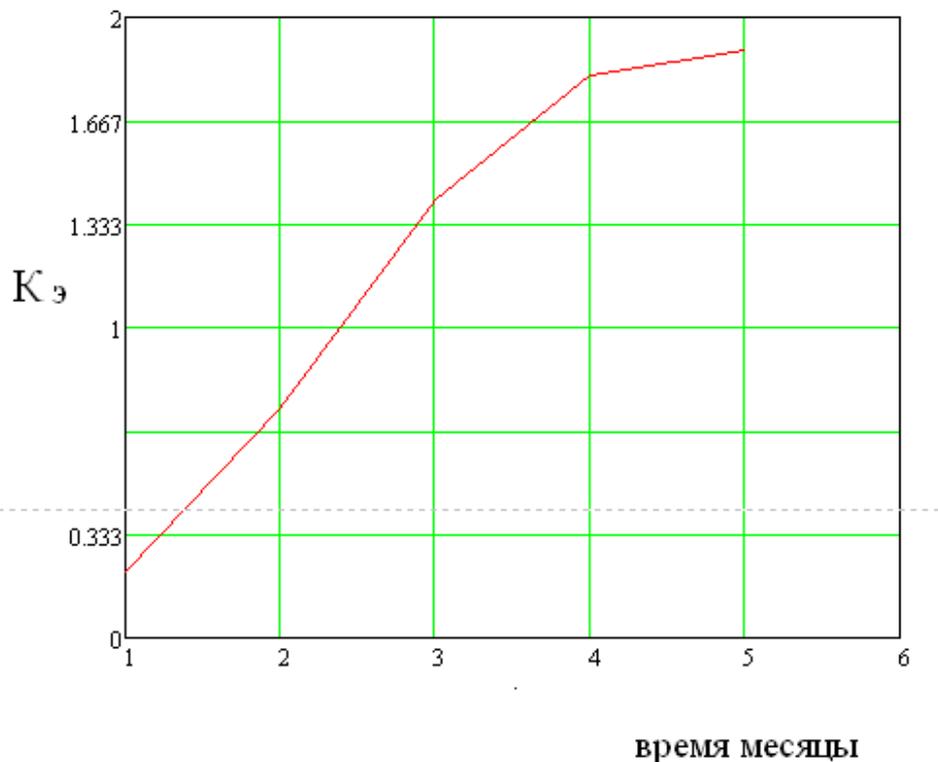


Рисунок 2.8 Результаты расчёта коэффициента эффективности диагностических мероприятий методом анализа внешних температурные поля.

Анализ результатов расчётов коэффициента эффективности диагностических мероприятий показал, что за три месяца до отказа оборудования эффективность предложенного метода превысила эффективность вибродиагностики практически на 34% ($K_{\text{этп}}=1,41$, $K_{\text{эвд}}=1,06$).

Предложенный метод позволяет значительно, до двух раз, сократить время предварительной диагностики неисправностей с устойчивым предсказанием времени отказа за 2-3 месяца до наступления критического состояния, что снижает издержки на выявление неисправности агрегатов и упрощает процедуры планирования мероприятий по обслуживанию и ремонту металлургического оборудования.

2.4 Выводы по главе 2

1. Обоснованы зоны применимости и типовые методы первичной диагностики узлов металлургического оборудования. Определена последовательность проведения первичной диагностики оборудования. Обоснованы типовые виды оборудования для проведения первичной диагностики.
2. Разработана методология оценки остаточного ресурса элементов металлургического оборудования на базе построения регрессионных зависимостей износов объектов при комплексной диагностике. Приведены использованные методы нахождения коэффициентов регрессии и оценки допустимого интервала контролируемых параметров.
3. Разработана методика оценки объемного распределения полей температур в элементах металлургических агрегатов с использованием тепловизионного контроля, позволяющая повысить эффективность первичной диагностики в целях обеспечения надежности и безопасной эксплуатации металлургического оборудования. Предложенный метод позволяет локализовать зону внутренних дефектов и оценить внутренние температурные поля.
4. Приведён анализ использования комплекса диагностических методов при диагностике состояния металлургического оборудования. Определён коэффициент эффективности метода первичной, диагностики с использованием определения температур элементов металлургического оборудования по фиксации наружных температурные полей. Предложенный метод позволяет значительно сократить время предварительной диагностики неисправностей с устойчивым предсказанием времени отказа за 2-3 месяца до наступления критического состояния, что снижает издержки на выявление неисправности агрегатов.

Глава 3 Математическое моделирование состояния рабочих сред в зазорах высоконагруженных систем металлургического оборудования

Предметом рассмотрения в этой главе являются вопросы моделирования движения жидких сред в высоконагруженных элементах оборудования функционирующих при давлениях рабочей среды свыше 50 МПа. Даже разработанная и описанная в главе 2 методика оценки температурные поля при диагностировании объектов даёт достоверные результаты только до 50 МПа, так как уже известные методики расчёта движения жидких сред не обладают требуемой точностью при давлениях свыше 50 МПа.

3.1 Обоснование и выбор исходных положений. Методика математического моделирования гидравлических характеристик рабочих сред высоконагруженных агрегатов

Повышение точности расчётов объёмного распределения температур увеличивает вероятность локализации дефектов механизмов и повышает достоверность процесса диагностирования. Эта задача требует оценки особенностей движения жидких сред внутри зазоров диагностируемого объекта методом моделирования особенно при высоких параметрах нагружения. Учитывая тенденцию к росту давлений в гидравлических силовых контурах и в зазорах статических опорах скольжения, возникает необходимость повышения точности расчётов процессов в этих элементах высоконагруженных систем. Повышение достоверности решения задачи расчёта температурных полей, в системах металлургических агрегатов, требует модернизации существующих математических моделей движения рабочих сред. Существующие модели ограничены учетом изменения параметров сред, а именно вязкости, плотности, оценки турбулентности по давлению до 50 МПа. Есть ограничения по учёту зон фазовых переходов при давлениях свыше 50 МПа.

Нетрудно заметить, что большинство из моделей, рассмотренных в первой и с некоторыми уточнениями во второй главах, основывается на предположении о

линейной зависимости турбулентных напряжений от градиентов усредненной скорости и температуры и не учитывает зависимости от давлений. Следует отметить, что с помощью данных моделей возможно получение информации только об усредненных характеристиках потока [46,78,135-141].

Для решения задачи особенностей движения жидких при давлениях свыше 50 МПа взята за основу модель E-L типа, обеспечивающая при проведении модернизации как учёт зависимости объёмной вязкости от давления и параметров зазоров, так и учёт турбулентности.

$$\rho \left(u_x \frac{\partial E}{\partial x} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_1 \mu_t) \frac{\partial E}{\partial y} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial E}{\partial y} \right)^2 - \frac{c_2 (\mu + c_1 \mu_t)}{L^2} E; \quad (3.1)$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial L}{\partial x} + u_y \frac{\partial L}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + c_3 \mu_t) \frac{\partial L}{\partial y} \right] - c_4 \frac{L}{E} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + B c_5 \sqrt{E \rho} \left[1 - \frac{L}{(R-r)^2} \right] - \rho c_6 L \frac{\partial U}{\partial x}; \quad (3.2)$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = \alpha Re_t \left[1 - \exp(\delta_2 Re_t^2) + \delta_3 \sqrt{Re_t} \exp(\delta_1 Re_t^2) \right]; \quad (3.3)$$

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

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

E – энергия турбулентности; τ – турбулентное трение; L – масштаб турбулентности; ε – скорости диссипации турбулентной энергии; ν_t – кинематический коэффициент вязкости турбулентной; μ_t – динамический коэффициент вязкости турбулентной.

Методика расчёта энергии турбулентности, масштаба турбулентности, скорости диссипации турбулентной энергии, коэффициенты α , δ учитывающие взаимосвязь с динамическим коэффициентом турбулентной вязкости хорошо проработаны в работах Глушко и в настоящей диссертации не рассматриваются. Коэффициенты c_1 - c_7 адаптируют модель к возможности проведения расчётов в щелевых каналах. Автором произведена корректировка коэффициентов c_1 - c_7 для щелевых каналов с учётом определяющего размера переменного сечения детально

описанная в работе [132]. Универсальные методики определения динамического коэффициента вязкости, плотности для этой модели ранее не применялись. Применение находили эмпирические зависимости оценки динамического коэффициента вязкости известные лишь для ряда веществ и только для конкретных давлений (при давлениях ниже 100МПа) и скоростей сдвига [142,143,144]. Применение известных эмпирических зависимостей в других условиях воздействия на рабочие среды не является корректной. Учёт факторов воздействия на рабочую среду, влияющих на оценку динамического коэффициента вязкости приводит к коррекции и связанных с ним величин, таких как Re_t , μ_t - динамический коэффициент вязкости турбулентной, E – энергия турбулентности, L – масштаб турбулентности, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, что увеличивает точность расчётов.

Значительное увеличение гидростатического давления, свыше 100 МПа, вызывает изменение плотности упаковки молекул рабочих сред, что смещает химическое равновесие системы и перераспределяет входящие в рабочие среды углеводороды по объёму. Это сказывается на изменении таких параметров как вязкость и плотность систем [85,145,146].

Равновесие химических систем принято оценивать при помощи значений энергии Гиббса, показывающих ожидаемые изменения энергии в ходе химических реакций и определяющих в принципе возможности протекания рассматриваемых химических реакций в данных условиях и для заданных термодинамических величин [145].

Причем определение значений энергии Гиббса и дальнейшее их использование в расчетах позволяет определять не только возможность и направление протекания реакции, но и производить анализ фазовых переходов и условий сосуществования фаз [146].

Поэтому при неоднородности термодинамических величин в объеме возможно возникновение локальных эффектов неоднородности смещения химического равновесия и течения различных физико-химических процессов [147]. Следовательно, при условии относительной замкнутости и

изолированности подсистемы, например, при рассмотрении малых зазоров прецизионных пар трения таких как золотники каскадов управления системами противоизгиба валков, зазоры высоконагруженных гидростатических опор скольжения, допустимо предположить возможность возникновения различных локальных физико-химических эффектов в данной области рабочей среды [148-150].

Результаты исследований различных авторов [55, 69, 151, 152] показывают наличие локальных реологических аномалий рабочей среды в малых зазорах при значительно меньших давлениях, чем появление данных эффектов в больших объемах [153-155], например, скачкообразное увеличение вязкости ПФМС-2 при температуре 20⁰С и давлении 200 МПа и аналогичное поведение ПФМС-4 с наличием резкого скачка и перегиба характеристики вязкости при данной температуре, но при давлениях несколько ниже 100 МПа. А в больших объемах эти жидкости при заданной температуре имеют точку структурного перехода при значительно большем давлении [69, 156].

Исследования [73] указывают на возможные течения различных физико-химических процессов также в областях рабочей среды, граничных с металлической стенкой, таких как зазоры прецизионных пар трения фиксированной толщины, при давлениях значительно ниже давлений полимеризации данной углеводородной среды в объеме [150, 157, 158]. Ахматов А.С. [55] и Ершов Б.И. [152] подтверждают наличие физико-химических эффектов, возникающих в пограничных слоях при гораздо более низких давлениях фазовых переходов, протекающих в больших объемах тех же рабочих сред [159]. Что приводит к необходимости коррекции состава среды при моделировании течения в зазорах. А также требует экспериментального определения величины критических зазоров, для оценки применимости зависимостей изменения параметров в «больших» и «малых» объёмах.

Помимо физико-химических процессов, происходящих в рабочих жидкостях, возможно взаимодействие соединений, входящих в состав жидкой среды, с материалами стенок зазоров [160, 161]. Именно данными процессами

обусловлено корродирование материалов стенок и образование на их поверхности оксидных пленок.

Также очевидно, что поверхностные слои металлов высоко химически активны вследствие наличия в них атомов, обладающих свободными связями, не компенсированными соседними атомами. Поэтому металлическая поверхность притягивает к себе атомы и молекулы различных веществ. Это приводит к появлению на поверхности пленок граничных слоев [59, 162].

Подобные явления принято рассматривать в рамках теории граничных слоев, которые являются, с одной стороны, адсорбционными, а с другой стороны, кристаллическими образованиями [163] оказывающими влияние на вязкость граничных слоёв, следовательно, эти эффекты необходимо отражать при решении системы уравнений 3.1-3.3.

Очевидно, что граничные монокристаллы, представляющие собой мультимолекулярные адсорбционные слои, состоящие из полярных молекулярных цепей углеводородов, которые образуются на металлических поверхностях, в целом по своему строению подобны кристаллам, созданным теми же молекулами в объеме, вне действия сторонних сил. Но свойства молекулярной решетки граничных слоев, особенно в малых зазорах, при двухстороннем воздействии твердых тел зачастую отличаются от кристаллов, образованных данными молекулами в объеме [55] что подтверждает необходимость учёта величины зазора при решении системы уравнений 3.1-3.3 для повышении достоверности результатов моделирования при проведении процессов диагностирования высоконагруженных узлов металлургического оборудования.

Например, при превращениях жидких парафинов и насыщенных жирных кислот входящих, в состав рабочих жидкостей диагностируемых узлов, в твердокристаллические соединения, возникают переходы от поворотных конфигураций молекул к линейным трансизомерным конфигурациям. При этом, несомненно, основное значение при структурных изменениях имеет именно твердая фаза, вокруг которой существует мощное поле, воздействующее на молекулы адсорбционного слоя [164-166]. Известно, что на монокристаллических

поверхностях мультимолекулярный адсорбционный слой будет формироваться по принципу кристалло-химического соответствия, образуя монокристаллические структуры, а на поликристаллической поверхности будут образовываться поликристаллические адсорбционные структуры с переходом в монокристаллические по мере удаления от твердой поверхности [55, 167].

Монокристаллические слои обладают одноосной анизотропией и полной изотропией по осям, тангенциальным твердой поверхности [168]. Также подобные адсорбционные структуры обладают неоднородностью механических свойств в сечении по нормальной оси к твердой поверхности, например, нормальных градиентов упругости в отличие от структур, образованных вне влияния экзополей конденсированных фаз. Эти эффекты оказывают влияние на вязкость близ лежащих к твердой поверхности граничных слоёв.

Существуют значительные различия структур адсорбционных слоев, образованных на поверхности твердого тела и на границе жидкости и заключенных между двух твердых поверхностях [169,170]. Подобные различия носят как количественный, так и качественный характер [171] и должны быть экспериментально подтверждены при корректировке модели.

Помимо кристаллических структур возможно образование на поверхностях твердой фазы и жидкокристаллических соединений с ярко выраженным ближним порядком, что приводит к аномальным упругопластическим свойствам, то есть и к различным вязкостным аномалиям [55] в зонах малых зазоров.

Достаточно хорошо известны физико-химические эффекты трансформации гомогенных граничных слоев под действием изменения давления в статике и динамике [69,172-175].

Поэтому очевидно, что высокие давления способны потенцировать физико-химические процессы и смещать термодинамическое равновесие системы, тем самым инициируя в углеводородной среде смазочных материалов различные химические реакции. Если все описанные процессы протекают при достаточно высоких давлениях, то при снятии давления происходит возвращение реологической системы к начальным термодинамическим величинам, то есть

создаются условия обратимости рассматриваемых химических процессов [176, 177] что подтверждается экспериментальными данными, приведёнными в главе 5.

Как правило, данные процессы, протекающие при высоких давлениях, можно разделить на процессы полимеризации, поликонденсации, деполимеризации и деструкции [69]. Для некоторых соединений принципиальная обратимость процессов полимеризации доказана рядом исследований [167, 178], а возможность протекания процесса деполимеризации полимера, полученного в механических силовых полях при экстремальных значениях рабочих давлений, в целом очевидна. Очевидно и более вероятное протекание подобных процессов в зазорах пар трения, так как на данных участках зазоров рабочие среды подвергаются наиболее экстремальным нагрузкам температурных и механических полей [179], также процессы течения рабочих сред в зазорах пар трения следует описывать по аналогии с гидродинамикой граничных слоев [180]. Примечательны проведенные А.С. Ахматовым исследования [54], которые выявили наличие внезапной перестройки структуры граничных слоев стеариновой кислоты при постепенном повышении давления. Этот эффект способен приводить к образованию в малых зазорах локальных зон более высокой упругости и вязкости при значительно более низких давлениях подобных структурных переходов в больших объемах данных сред что необходимо учитывать при диагностировании агрегатов.

Многими авторами принято эффект стеклования смазочной среды описывать при помощи теории фазовых переходов Ландау [181]. Для этого в рассматриваемую модель вводятся феноменологические параметры, которые характеризуют состояние системы [182]. Например, возможно описание процесса стеклования граничного слоя смазочной среды в терминах ее сдвигового плавления посредством параметра θ , отражающего степень застеклованности среды [183, 184]. Это позволило получить кинетическое уравнение, описывающее зависимость скорости фазового перехода в смазочной среде от скорости скольжения [171].

Доказано, что при одноосном сжатии граничных слоев при постепенном повышении давления происходит перестройка структуры вещества. В случае со стеариновой кислотой, используемой в качестве поверхно активного вещества в рабочих и смазочно охлаждающих технологических жидкостях, наблюдалось повышение упругости структуры граничного слоя [67].

Подобные изменения структуры наблюдались в экспериментах Бриджмена и Таммана при всестороннем сжатии однокомпонентных систем [67], но не существует достаточных данных о поведении многокомпонентных углеводородных смазочных материалов в граничных слоях [153, 185, 186].

Структуры рабочих жидкостей предлагается рассматривать как системы твердых растворов углеводородов, причем возможны два варианта: растворителем является углеводород с меньшей длиной цепи и растворителем является углеводород с большей длиной цепи [167, 187-189].

Также не стоит забывать про наличие переходов второго рода, приводящих к изменению термодинамических и электромагнитных свойств веществ без протекания явного межфазового перехода (без фазового перехода первого рода) [190], что оказывает существенное влияние на возникновение различных физико-химических аномалий, в том числе локальных, а также на локальную смену значений термодинамических констант рассматриваемых веществ.

На сегодняшний день теория граничного трения базируется в основном на работах Харди, посвященных органическим пленкам и эффектам адсорбции в их адгезионной составляющей [191,192].

Принято считать, что физическая адсорбция на поверхностях твердых тел является экзотермическим обратимым процессом, приводящим к увеличению концентрации адсорбируемого вещества, как правило, жидкого на поверхности тела без образования химических связей, но если поверхность является активной, то после физической адсорбции между адсорбированной молекулой и поверхностью возникает полноценная химическая связь – хемосорбция, а на менее активной поверхности остаются преобладать физические взаимодействия с поверхностью, аналогичные Ван-дер-Ваальсовым [55,193].

Ряд исследовательских работ, проведенных в данном направлении, показал, что толщина неразрушенного слоя пленки при трении в ряде случаев близка к линейным размерам молекул веществ [194]. Причем не существует значимых различий физико-химических свойств в пленках, образованных по механизмам контактной гидродинамики и граничной смазки [195, 196].

В целом, сдвиговое сопротивление до мономолекулярных граничных слоев зависит от давления. Данную зависимость можно выразить как

$$\tau = \tau_1 + CP, \quad (3.5)$$

где τ_1 – постоянная, зависящая от шероховатости поверхностного контакта; $\tau_1 = 0,1$; C – постоянная, зависящая от состава углеводородной системы.

Для высоких давлений

$$\tau_1 \ll CP; f = \tau/P \approx C \approx 0,1.$$

$\tau(P)$ соответствует коэффициенту граничного трения и подтверждает наличие эффекта стеклования жидких полимеров при высоких давлениях [197].

Экспериментально были установлены возможные структурные различия смазочных пленок идентичных образцов в зависимости от температуры, давления и скорости сдвига [192]. Также был установлен динамический нестационарный характер фазовых переходов в малых смазочных слоях, например, кристаллизация смазки при снижении температуры среды и плавление твердой структуры при понижении скорости скольжения или росте давления. Подобный эффект приводил к перестроению структуры граничного слоя и к снижению трения в контакте до кинетического [55, 198, 244].

Распространенные модели [54] объясняют скачки граничного трения меньших температур плавления наличием локальных фазовых превращений в адсорбционном слое и появлением островков твердой фазы [199].

Сопоставления моделей, описывающих поведение смазочной среды при фазовом переходе, стекловании и расстекловании на мезоуровне, в ряде исследований [55, 200] показали достаточно высокое совпадение получаемых результатов с опытными данными.

При описании реологических процессов, протекающих в парах трения, нельзя забывать о возникновении некоторых термических эффектов. Их распределение будет также неоднородным как по объему жидкой среды, так и в материале стенки проточной части, а изменения теплопроводности и температуропроводности рабочей жидкости в механических силовых полях будут иметь нелинейную зависимость, что подтверждается экспериментальными данными автора. Подобные эффекты появляются вследствие некоторого изменения объема жидкости в рабочих полостях систем высокого давления.

Напряжения сжатия приводят не только к изменению плотности углеводородной среды, но и при некоторых докритических значениях давлений способствуют деформации структуры молекул без существенного роста плотности, видоизменяя физико-химические свойства веществ [198]. Оценка степени деформации структуры молекул позволила расчётным путём оценить изменение параметров вещества при нагружении высоким давлением. Деформация структуры молекул рабочей среды приводит к варьированию диффузности анизотропной углеводородной среды. Причем анизотропия и так свойственна движущимся жидкостям, в особенности неньютоновским, к которым относится подавляющее большинство жидких рабочих сред.

Почти все органические кислоты являются слабыми электролитами, способными незначительно диссоциировать на ионы, находящиеся в динамическом равновесии с недиссоциированными молекулами исходных веществ. Принимая во внимание существенные динамические нагрузки, возникающие в гидравлических системах высокого давления, также очевидно, что молекулы подвергаются механической деструкции и теряют электронейтральность [201]. Известно, что в технических объектах наиболее высокие динамические нагрузки возникают в парах трения. Причем разумно предположить, что деструкция молекул, как правило, происходит в местах с наименьшей энергией химической связи, так как на разрушение данных связей требуется передача наименьшего количества энергии. Подобные явления создают благоприятные условия для инициации электрохимических процессов. Известно и

о наличии явлений накопления электростатического заряда поверхностями пар трения выявленных при анализе работы прокатных валков[55], что также может провоцировать возникновение локальных электрохимических эффектов. Моделирование описанных выше эффектов позволит повысить достоверность прогнозов поведения высоконагруженных элементов металлургических машин при эксплуатации. Учёт описанных выше факторов влияющих на характеристики рабочих сред показывает необходимость моделирования физико-химических процессов в высоконагруженных узлах оборудования при решении систем уравнений 3.1-3.3.

3.2 Моделирование физико-химических процессов в высоконагруженных узлах оборудования

Требование повышения достоверности прогнозов при моделировании процессов в высоконагруженных опорах скольжения валков прокатных станов в режимах граничного трения, в элементах силового гидрооборудования станов при динамическом воздействии требует учёта изменения объемной вязкости от условий нагружения системы. Рассматривая задачу определения зависимости объемной вязкости углеводородов от давления окружающей среды и условий нагружения, необходимо четко понимать не только значительную сложность описания процесса деформации полимерных цепей и полимеризации углеводородных многокомпонентных систем, но и то, что рабочая жидкость состоит из легированного базового масла, объемная доля которого значительно превышает объемные доли легирующих элементов. Для упрощения подхода к определению характеристики вязкости от давления рассмотрим пока отдельно процессы, протекающие в базовом веществе и присадках, и процесс полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар для однокомпонентного базового масла.

Очевидно, что в условиях высоких давлений рабочая среда испытывает напряжения сжатия, приводящие к изменению ее объема, следовательно, и к изменению плотности всех соединений, входящих в состав данного

многокомпонентного углеводородного раствора. Процессы деформации углеводородных цепей описываются различными численными моделями [54, 74].

Стоит отметить метод инкрементов, позволяющий при помощи Ван-дер-Ваальсового объема повторяющегося звена описывать изменения плотности полимерных соединений [202, 203]. Используя метод инкрементов, рассмотрим процесс изменения исследуемого объема рабочей среды во внешних механических полях.

В методе инкрементов при определении какой-либо величины Q , в качестве которой используется величина, обратная температуре плавления, плотности упаковки, температуре стеклования и т. д., для полимера с заданным химическим строением повторяющегося звена воспользуемся зависимостью [203]:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta V_i}{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}, \quad (3.6)$$

где Q_i – вклад i -го атома в величину Q , которая зависит от энергии взаимодействия.

В общем виде данную зависимость можно записать как

$$Q_i = f_i(D_i).$$

Параметр D_i описывает значения энергии и будет зависеть от конкретно поставленной задачи. Например, в случае рассмотрения:

- температуры деструкции в качестве D_i принимается энергия химической связи;
- плавления полимера в качестве D_i принимается энергия Ван-дер-Ваальсового взаимодействия.

Ван-дер-Ваальсовый объем вычисляем по формуле:

$$\Delta V_i = \frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{\pi h_i^3 (3R - h_i)}{3}, \quad (3.7)$$

где R – межмолекулярный Ван-дер-Ваальсовый радиус рассматриваемого атома,

h_i – высота сегмента;

$$h_i = R - \frac{R^2 + d_i^2 - R_i^2}{2d_i}; \quad (3.8)$$

R_i – Ван-дер-Ваальсовы радиусы соседних атомов, валентно-связанных с рассматриваемым;

d_i – длина связи между двумя атомами.

Очевидно, что в условиях высоких давлений рабочая среда испытывает напряжения сжатия, приводящие к изменению ее объема, следовательно, и к изменению плотности всех соединений, входящих в состав данного многокомпонентного углеводородного раствора. Поэтому, используя метод инкрементов, рассмотрим процесс изменения исследуемого объема рабочей среды во внешних механических полях.

Плотность полимерного соединения по методу инкрементов [203]

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (3.9)$$

где m – масса вещества, или $\rho = \frac{k_{cp} M}{N_A \sum \Delta V_i}$;

$$\rho = \frac{k_{cp} (a_1 M_1 + a_2 M_2 + \dots + a_n M_n)}{N_A [a_1 (\sum \Delta V_i)_1 + a_2 (\sum \Delta V_i)_2 + \dots + a_n (\sum \Delta V_i)_n]}, \quad (3.10)$$

где M – молярная масса мономера, $\sum \Delta V_i$ – $\sum \Delta V_i$ Ван-дер-Ваальсовый объем повторяющегося звена, N_A – число Авогадро, a_1, a_2, \dots, a_n – молярные доли мономеров:

$$a_n = \frac{\mathcal{G}_n}{\sum_i \mathcal{G}_n}. \quad (3.11)$$

Также справедливо:

$$\rho = \frac{k_{cp} \sum_{k=1}^{k=n} a_k M_k}{N_A \sum_{k=1}^{k=n} a_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}. \quad (3.12)$$

Принимая во внимание, что в данной работе речь идет о полимеризации и поликонденсации во внешних механических полях в растворах углеводородов, определяем средний коэффициент молекулярной упаковки раствора полимера.

$$k_{cp} = \frac{V_{собств}}{V_{общ}} \quad (3.13)$$

Средний коэффициент молекулярной упаковки представляет отношение реального Ван-дер-Ваальсового объема полимерной цепи к объему, который занимает молекула в исследуемом образце.

$$k_{cp} = \frac{\sum \Delta V_{i \text{ молекулы}}}{V_{вещества} / n_{молекул}}. \quad (3.14)$$

Для раствора сополимера

$$k_{cp} = \frac{a_1 \Delta V_{1 \text{ молекулы}} + a_2 \Delta V_{2 \text{ молекулы}} + \dots + a_n \Delta V_{n \text{ молекулы}}}{V_{вещества} / n_{молекул}}; \quad (3.15)$$

количество молекул

$$n_{молекул} = \mathcal{G} \cdot N_A; \quad (3.16)$$

количество вещества

$$\mathcal{G} = \frac{m}{M}. \quad (3.17)$$

Мольная доля вещества

$$x = \frac{\vartheta_{вещества}}{\sum \vartheta_i}. \quad (3.18)$$

$$k_{cp} = \frac{N_A \sum \Delta_i}{M / \rho}. \quad (3.19)$$

Средний коэффициент молекулярной упаковки для сополимерной структуры принимает вид [205]

$$k_{cp} = \frac{N_A (a_1 \Delta V_{1 \text{ молекулы}} + a_2 \Delta V_{2 \text{ молекулы}} + \dots + a_n \Delta V_{n \text{ молекулы}})}{(a_1 M_1 + a_2 M_2 + \dots + a_n M_n) / \rho}. \quad (3.20)$$

Принимая во внимание значительную сложность описания процесса полимеризации углеводородных многокомпонентных систем и то, что гидравлическая жидкость состоит из легированного базового масла, объемная доля которого значительно превышает объемные доли легирующих элементов, рассмотрим процесс полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар для однокомпонентного базового масла. Так как мы выразили коэффициент молекулярной упаковки как отношение реального Ван-дер-Ваальсового объема полимерной цепи к объему, который возможно занять молекуле в исследуемом образце, справедливо следующее:

$$\frac{m}{V_3} = \frac{k_{cp}M}{N_A \sum \Delta V_i}; \quad (3.21)$$

$$\frac{m}{V_3} = \frac{k_{cp}(a_1M_1 + a_2M_2 + \dots + a_nM_n)}{N_A [a_1(\sum_i \Delta V_i)_1 + a_2(\sum_i \Delta V_i)_2 + \dots + a_n(\sum_i \Delta V_i)_n]}; \quad (3.22)$$

где V_3 – объем углеводородной среды в зазора, m – масса углеводородной среды.

С учетом выражений (3.7) и (3.8), учитывая межмолекулярный Ван-дер-Ваальсовый радиус запишем:

$$\begin{aligned} \frac{m}{V_3} = & \frac{k_{cp}(a_1M_1 + a_2M_2 + \dots + a_nM_n)}{N_A \left\{ a_1 \left[\sum_i \left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_1 + \right.} \\ & \left. + a_2 \left[\sum_i \left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_2 + \right. \\ & \left. + \dots + a_n \left[\sum_i \left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_n \right\}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

В зависимости объема углеводородной среды от давления коэффициент объемного сжатия [67]

$$\beta_V = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \right), \quad (3.24)$$

или

$$\beta_V = -\frac{1}{V_3} \frac{\partial V_3}{\partial \rho}, \quad (3.25)$$

где p – давление в зазоре.

Также справедливо

$$\beta_V = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}. \quad (3.26)$$

Модуль упругости рабочей жидкости

$$E_0 = \frac{1}{\beta_V}. \quad (3.27)$$

Зависимость объема рабочей жидкости от давления с учетом выражения (3.27)

$$-\frac{1}{V_3} = \frac{\Delta V_3}{\Delta p} E_0. \quad (3.28)$$

Зависимость процесса полимеризации углеводородной среды в зазорах от рабочего давления примет вид:

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta p}{\Delta V_3 E_0} &= \frac{m \left\{ N_A \sum \frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 \left[3R - \left(R - \frac{R^2 + d_i^2 - R_i^2}{2d_i} \right) \right] \right\}}{k_{cp} M} = \\ &= \frac{-m \left\{ N_A \left[a_1 \sum_i \left[\left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_1 + \right. \right. \\ &+ a_2 \sum_i \left[\left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_2 + \dots + \\ &\left. \left. + a_n \sum_i \left[\left(\frac{4}{3} \pi R^3 - \sum_i \frac{1}{3} \pi h_i^3 (3R - h_i) \right) \right]_n \right] \right\}}{k_{cp} (a_1 M_1 + a_2 M_2 + \dots + a_n M_n)}. \quad (3.29) \end{aligned}$$

Рассмотрим полученную численную зависимость на примере керосина, который является смесью жидких углеводородов с различной молекулярной массой и является базовым веществом для наиболее распространённых рабочих сред металлургического оборудования. В общем, для керосина в зависимости от элементного состава углеводородной смеси условная химическая формула может быть записана как $C_{7.15}H_{13.0}O_{0.0625}$ или $C_{7.15}H_{14.0}$, исходя из допущения, что условная молекулярная масса пробы керосина $m_T = 100$. Для постановки натурального эксперимента взяты два химически чистых образца насыщенных алифатических углеводородов, входящих в состав керосина – C_9H_{20} и $C_{14}H_{30}$. Для ряда простых веществ результаты расчёта плотности, коэффициента объёмного сжатия, модуль Юнга, Ван-дер-Ваальсового объема приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета веществ

Вещество	$\sum \Delta V_i, \text{Å}^3$ при 1 атм	M, г/моль	$k_{\text{ср.раст}}$	$E_o, \text{МПа}$ Модуль Юнга	m, г	$\rho_{\text{норм.}}$ г/см ³	$\beta, \text{МПа}^{-1}$ Коэффициент объёмного сжатия
Нонан C_9H_{20}	160.30	128.09	0.54	$0.851 \cdot 10^2$	7.18	0.718	$11.75 \cdot 10^{-4}$
Тетрадекан $C_{14}H_{30}$	247.26	198.14	0.57	$1.09 \cdot 10^2$	7.64	0.764	$9.10 \cdot 10^{-4}$
Нонан 50% +тетрадекан 50%	$a_1 \cdot 160.3 +$ $+a_2 \cdot 247.2$	$a_1 \cdot 128.09 +$ $+a_2 \cdot 198.14$	0.55	$0.97 \cdot 10^2$	7.41	0.741	$10.30 \cdot 10^{-4}$

Зависимость объема рабочей жидкости от давления для:

$$\text{Нонан: } -\frac{\Delta p}{\Delta V_3 \cdot 0.851 \cdot 10^2} = \frac{7.18 \cdot (6.022 \cdot 10^{23} \cdot 160.30 \cdot 10^{-24})}{128.09 \cdot 0.54};$$

$$\text{Тетрадекан: } -\frac{\Delta p}{\Delta V_3 \cdot 1.09 \cdot 10^2} = \frac{7.64 \cdot (6.022 \cdot 10^{23} \cdot 247.26 \cdot 10^{-24})}{198.14 \cdot 0.57};$$

$$\text{Нонан 50%+тетрадекан 50%: } -\frac{\Delta p}{\Delta V_3 \cdot 0.97 \cdot 10^2} = \frac{7.41 \cdot (6.022 \cdot 10^{23} [0.5 \cdot 160.30 \cdot 10^{-24} + 0.5 \cdot 247.26 \cdot 10^{-24}])}{0.55 \cdot (0.5 \cdot 128.09 + 0.5 \cdot 198.14)}.$$

Из расчетов следует, что чем больше коэффициент молекулярной упаковки полимерного соединения, входящего в состав керосина, тем выше значение давления, требуемого для увеличения плотности временной полимерной структуры, образовавшейся в рабочей среде, и перехода процесса обратимой полимеризации или поликонденсации к необратимому процессу механического стеклования данной полимерной структуры. Очевидно, что значение данного

коэффициента молекулярной упаковки полимерного соединения напрямую зависит от значения Ван-дер-Ваальсового объема молекулярной цепи, то есть, между значениями Ван-дер-Ваальсового объема молекулярной цепи и давлением, требуемым для увеличения плотности, существует зависимость. Очевидно и то, что значения Ван-дер-Ваальсовых объемов молекулярных цепей во многом определяют изменения модуля упругости от давления [206]. Поэтому анализ и установление численной зависимости значений Ван-дер-Ваальсового объема молекулярных цепей, компонентов рабочих сред систем высокого давления от рабочих давлений имеет явное и достаточно широкое прикладное значение.

Анализ данной численной зависимости на примере двух различных углеводородных компонентов C_9H_{20} и $C_{14}H_{30}$, входящих в состав керосина, показал наличие связи между Ван-дер-Ваальсовым объемом повторяющегося звена полимерного соединения и значением давления, требуемого для увеличения плотности временной полимерной структуры, образовавшейся в рабочей среде, а следовательно, и для перехода процесса обратимой полимеризации или поликонденсации к необратимому процессу механического стеклования данной полимерной структуры.

Теоретически полученная зависимость стационарна и даже при рассмотрении широкого диапазона давлений линейна, потому что способна оценивать только существующую численную связь между размерами цепей полимерных структур и изменениями их плотности в механических полях, но не способна оценивать изменения значений размеров полимерных цепей при их деформации, а также эффекты релаксации. Как известно, углеводородные системы обладают неньютоновскими свойствами, следовательно, учитывая наличие в них вязкостных аномалий, можно сделать вывод, что зависимость течения данных структур до момента полного стеклования рабочей среды будет иметь нелинейный характер. Также очевидно, что вязкостные кривые, полученные при плавном повышении, например, сдвиговых напряжений и плавном их снятии, не будут совпадать, что обусловлено запаздыванием процесса релаксации молекул.

Теоретически полученная зависимость между размерами цепей сополимерных структур и изменениями их плотности в механических полях для сополимерных систем до момента полного стеклования рабочей среды линейна, имеет схожий характер. Как уже отмечалось, это связано с тем, что метод инкрементов, как и другие известные методы расчета Ван-дер-Ваальсовых объемов, не позволяет рассчитывать изменение перекрытия Ван-дер-Ваальсовых объемов химически связанных атомов под действием термодинамических параметров, следовательно, не позволяет прогнозировать изменения Ван-дер-Ваальсовых объемов молекулярных цепей в условиях высоких давлений. Поэтому приведенные аналитические зависимости корректны только в том случае, если вводятся значения Ван-дер-Ваальсовых объемов для расчетных давлений. Также стоит отметить, что на сегодняшний день самым распространенным и достоверным методом оценки Ван-дер-Ваальсовых объемов молекул является метод рентгеноструктурных исследований, которые проводятся, как правило, при нормальных условиях (температуре около 20⁰С и давлении атмосферном), то есть, достаточная справочная база данных значений Ван-дер-Ваальсовых объемов или Ван-дер-Ваальсовых радиусов, полученных в условиях высоких давлений, на данный момент отсутствует. Использование методов математического моделирования позволяет определять значения Ван-дер-Ваальсовых объемов или Ван-дер-Ваальсовых радиусов, в условиях высоких давлений необходимых для определения зависимости вязкости от давления. Динамика молекулярной цепи приводит к изменению взаимного перекрытия Ван-дер-Ваальсовых сфер.

Предложенная методика (уравнение 3.29) является составляющей частью разрабатываемой модели позволяющей прогнозировать изменение параметров рабочих сред в зазорах высоконагруженного металлургического оборудования. Учёт этих факторов повышает точность диагностирования.

3.3 Математическое описание оценки объемной вязкости рабочих жидкостей

Развитие современного металлургического оборудования предусматривает применение в качестве рабочих сред составов, обладающих неньютоновскими

свойствами . Для начала с целью учета неньютоновских свойств многокомпонентных углеводородных систем рассмотрим более подробно их вязкостные характеристики и в целом реологию процесса в реальных условиях.

При рассмотрении изменений плотности углеводородных соединений в механических полях – механическом стекловании – необходимо учитывать ряд факторов.

Как известно, значения Ван-дер-Ваальсовых объемов зависят также от термодинамических параметров. Например, невозможно построить линейную температурную зависимость Ван-дер-Ваальсовых радиусов молекулярно-кристаллических структур, так как в получаемых молекулярно-кристаллических структурах преобладают внешние молекулярные колебания – колебания каждой молекулы как целого и колебания отдельных относительно подвижных атомных группировок или фрагментов молекул, которые зависят прежде всего не от индивидуальности атомов, а от размеров и формы молекул и подвижных фрагментов. Поэтому имеющиеся табличные данные для Ван-дер-Ваальсовых объемов рассчитаны на основе Ван-дер-Ваальсовых радиусов, полученных при температурах, близких комнатной, так как в основном рентгеноструктурные данные получают при комнатной температуре, как и большинство различных табличных констант.

Стоит учитывать, что межатомное расстояние в конденсированном состоянии зависит от интенсивности межатомного взаимодействия. Этот эффект проявляется в зависимости различных физических свойств от параметров состояния вещества. Также необходимо понимать, что Ван-дер-ваальсовы сферы валентно связанных атомов в пределах одной молекулы перекрываются [87].

Следовательно, степень взаимного перекрытия Ван-дер-ваальсовых сфервалентно связанных атомов будет зависеть от значения угла связи, изменение которого в процессе некоторой деформации молекулы в механических полях приведет к изменению объема перекрытия Ван-дер-Ваальсовых сфер, то есть, к изменению Ван-дер-Ваальсового объема молекулы.

Поэтому определение зависимости Ван-дер-Ваальсовых объемов в условиях сверхвысоких давлений является научно значимой и важной задачей.

Как известно, динамическая вязкость среды численно связана с плотностью коэффициентом кинематической вязкости выражением [67]:

$$\eta = \mu_{\kappa} \rho. \quad (3.30)$$

Но в данном исследовании применяется многокомпонентная углеводородная среда и тогда

$$\eta = \mu_{\kappa} \frac{k_{cp} (a_1 M_1 + a_2 M_2 + \dots + a_n M_n)}{N_A \left[a_1 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_1 + a_2 \left(\sum_i \Delta V_i \right)_2 + \dots + a_n \left(\sum_i \Delta V_i \right)_n \right]}. \quad (3.31)$$

Так как значения модуля упругости существенно зависят от термодинамических параметров, для условий высоких давлений необходимо производить поправки в значениях модулей упругости исследуемых веществ. Производить измерения модуля упругости в камере высокого давления стандартными методами не вызывает затруднений.

Модуль упругости зависит от значения Ван-дер-Ваальсового объема [167]:

$$E = \frac{\sum_i \Delta V_i}{\sum_i \frac{\Delta V_i S_i}{k_i l_i}}. \quad (3.32)$$

Поэтому связь модуля упругости с коэффициентом молекулярной упаковки можно выразить как

$$E = \sum_I \frac{k_{cp} M}{\rho N_A} \bigg/ \sum_I \frac{\frac{k_{cp} M}{\rho N_A} S_I}{k_i l_i}, \quad (3.33)$$

где k_i – коэффициент упругости молекулярной цепи, при давлениях до 2000 атм остается неизменным; l_i – характерный размер межмолекулярного расстояния.

Для пересчета площади введем параметр

$$Y = \frac{\Delta V_i}{S l_{\text{молекулы}}}, \quad (3.34)$$

характеризующий форму молекулярной цепи [95].

Очевидно, что изменение параметра, характеризующего форму молекулярной цепи, обратно пропорционально изменению геометрических параметров молекулы под действием давления. Приведём расчётную схему:

$$\text{Шаг 1: } Y_1 + \Delta Y_{1-2} = Y_2; \Delta Y_{1-2} = \frac{V_1 \Delta V_1}{100} \%.$$

$$\text{Шаг 2: } Y_2 + \Delta Y_{2-3} = Y_3; \Delta Y_{2-3} = \frac{V_2 \Delta V_2}{100} \%.$$

$$\text{Шаг 3: } Y_1 + \Delta Y_{1-2} = Y_2; \Delta Y_{3-4} = \frac{V_3 \Delta V_3}{100} \%.$$

$$\text{Шаг } n: Y_n + \Delta Y_{n-(n+1)} = Y_{n+1}; \Delta Y_{n-(n+1)} = \frac{V_n \Delta V_n}{100} \%.$$

Также очевидно и то, что степень деформации молекулы прежде всего будет зависеть от степени деформации основной углеродной цепи.

Поэтому Ван-дер-Ваальсовая поверхность молекулярной цепи оценивается:

$$S_i \frac{\Delta V_i}{Yl_{\text{молекулы}}}. \quad (3.35)$$

$$\text{Тогда } E = \sum_i \frac{k_{cp} M}{\rho N_A} \bigg/ \sum_i \frac{\frac{k_{cp} M}{\rho N_A} \cdot \frac{k_{cp} M}{\rho N_A}}{k_i l_i} \cdot \frac{Yl_{\text{молекулы}}}{k_i l_i}. \quad (3.36)$$

Уменьшение объема образца приводит не только к деформации и уменьшению объемов молекул, но и к уменьшению межмолекулярных пространств, что в свою очередь приводит к изменению энергии взаимодействия молекул жидкой среды или даже к образованию химических связей и их переходу в квазитвердое состояние. Численно оценить подобный эффект изменения энергии взаимодействия молекул оценивается при помощи формулы Панченкова:

$$\eta = 3\sqrt{6R} \sqrt[3]{\frac{V_m^2}{N_A} M^{-\frac{5}{6}} \rho^{\frac{4}{3}} T^{\frac{1}{2}} f_S} e^{\frac{\Theta}{RT}} \left(1 - e^{-\frac{\Theta}{RT}}\right)^2, \quad (3.37)$$

где R – газовая постоянная; $V_m = M/\rho$ – молярный объем; f_S – вероятностный коэффициент; \mathcal{E} – энергия взаимодействия молекул жидкости.

Для определения характерного размера межмолекулярного расстояния введем понятие «эффективный диаметр молекулы» – минимальное расстояние, на которое возможно сближение центров двух молекул при столкновении. Считается, что столкновение между молекулами может произойти только в случае, когда центры молекул сблизятся на расстояние, меньшее или равное эффективному диаметру молекулы.

Для молекул с точечной симметрией условный центр – это центр масс молекул. Для сложных молекул условный центр определяется феноменологически.

На практике принято определять эффективный радиус молекулы [95]

$$\langle r \rangle = \frac{1}{2\pi^2} \int \int r(\varphi, \theta) d\varphi d\theta. \quad (3.38)$$

Принимая во внимание, что именно Ван-дер-Ваальсовы силы объединяют взаимное притяжение и взаимное отталкивание молекул, очевидно, что Ван-дер-Ваальсовы радиусы молекул наиболее хорошо характеризуют оптимальные эффективные радиусы молекулы, то есть

$$\langle r \rangle = \frac{1}{2\pi^2} \int \int r_i(\varphi, \theta) d\varphi d\theta. \quad (3.39)$$

Для расчета Ван-дер-Ваальсовых сил запишем потенциал Леннарда-Джонса [164]:

$$\mathcal{E}(r) = \mathcal{E}_0 \left[\left(\frac{r_0}{r_i} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_i} \right)^6 \right], \quad (3.40)$$

где \mathcal{E}_0 – минимум энергии, r_0 – равновесное расстояние (взаимное притяжение и взаимное отталкивание молекул).

При достаточно высоких давлениях начинаются межфазовые превращения (жидкая фаза – твердая фаза), а межмолекулярное расстояние в исследуемых жидких средах значительно уменьшается. Поэтому изменение объема образца в

условиях сверхвысоких давлений происходит преимущественно за счет деформаций молекул (обратимой деформации), то есть дальнейшими изменениями межмолекулярного расстояния можно пренебречь.

Также считается, что при расстоянии, равном диаметру молекулы, сила притяжения молекул становится равной силе отталкивания. Очевидно, что до 10 МПа жидкие углеводороды в условиях нормальных температур не претерпевают значимых напряжений сжатия [145], поэтому в рамках данной исследовательской работы рассмотрим интервал рабочих давлений свыше 10 МПа.

Для определения изменения длины молекул введем функции координат $U_i = (X_1, X_2, X_3)$ и поле деформаций $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(X_1, X_2, X_3)$, а также запишем тензор деформации Коши [14]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right). \quad (3.41)$$

Перемещение точек на поле деформации

$$U_i(X'_1, X'_2, X'_3) = U_i^0 + \omega_{ij}^0 (X'_j - X_j^0) + \int_{M^0}^{M'} [\varepsilon_{ik} + (X'_j - X_j) (\varepsilon_{ik,j} - \varepsilon_{jk,i})] dX_k. \quad (3.42)$$

Также необходимо ввести условие для подынтегральной функции:

$$\frac{\partial}{\partial X_l} [\varepsilon_{ik} + (X'_j - X_j) (\varepsilon_{ik,j} - \varepsilon_{kj,i})] = \frac{\partial}{\partial X_k} [\varepsilon_{il} + (X'_j - X_j) (\varepsilon_{il,j} - \varepsilon_{lj,i})]. \quad (3.43)$$

Теперь опишем изменение объема молекулы. Зададим начальные размеры молекулы [14]: dx_1^0, dx_2^0, dx_3^0

и ее начальный объем $V_{\text{молекулы}}^0 = dx_1^0 dx_2^0 dx_3^0$.

После деформации размеры молекулы dx_1, dx_2, dx_3

и ее объем $V_{\text{молекулы}} = dx_1 dx_2 dx_3$,

$$\text{то есть } V_{\text{молекулы}} = (dx_1^0 + \Delta dx_1) (dx_2^0 + \Delta dx_2) (dx_3^0 + \Delta dx_3), \quad (3.44)$$

а изменение объема молекулы

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{молекулы}} &= V_{\text{молекулы}} - V_{\text{молекулы}}^0 = dx_1^0 dx_2^0 dx_3^0 \left(1 + \frac{\Delta x_1}{dx_1^0}\right) \left(1 + \frac{\Delta x_2}{dx_2^0}\right) \left(1 + \frac{\Delta x_3}{dx_3^0}\right) - \\ &- dx_1^0 dx_2^0 dx_3^0 = V_{\text{молекулы}}^0 [(1 + \varepsilon_{11})(1 + \varepsilon_{22})(1 + \varepsilon_{33} - 1)] = \\ &= V_{\text{молекулы}}^0 (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}\varepsilon_{11}) (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\varepsilon_{33}) \quad (3.45) \end{aligned}$$

$$\text{или } \frac{V_{\text{молекулы}} - V_{\text{молекулы}}^0}{V_{\text{молекулы}}^0} \approx \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \varepsilon_{kk} \quad (3.46)$$

При $|\varepsilon_{ij}| \ll 1$

$$\frac{V_{\text{молекулы}} - V_{\text{молекулы}}^0}{V_{\text{молекулы}}^0} = \varepsilon_{kk} = \varepsilon_{kk}^0 = \frac{\partial u_k}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \nabla u \quad (3.47)$$

в твердых средах по Рэлею.

Так как сила, действующая на объем, равна интегралу тензора напряжения на границе рассматриваемого объема по поверхности данного объема [207, 205], справедливо следующее:

$$P_i = \oint_S \sigma_{ij} dS_j \quad (3.48)$$

Известно, что силы Ван-дер-Ваальса включают все виды межмолекулярного как притяжения, так и отталкивания между молекулами веществ, следовательно, Ван-дер-Ваальсовы объемы дают представления о распределении электронной плотности атомов, снижающейся при удалении от ядра. Также Ван-дер-Ваальсовы объемы иллюстрируют наличие взаимной компенсации притяжения и отталкивания, которое возрастает при сближении атомов и обеспечивает между ними пространство. Следовательно, за счет Ван-дер-Ваальсового взаимодействия атомов, входящих в структуру молекул, будет обеспечиваться гарантированный зазор между молекулами, численно определяющийся дистанцией, соответствующей состоянию минимума энергии взаимодействия.

Расчётные значения вязкости приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Результаты расчетов вязкости

 η , МПа·с

Вещество	при давлении, атм					
	1	100	500	1000	1500	2000
Полидиметилсилоксан	1.936	2.110	2.420			
<i>n</i> -гексан	0.3200	0.3520	0.4160	0.5440	0.7360	1.0240
2-метилпентан	0.2980	0.3278	0.3847	0.5066	0.6854	0.9536
3-метилпентан	0.2980	0.3278	0.3847	0.5066	0.6854	0.9536
2,3-диметилбутан	0.3860	0.4246	0.5018	0.6562	0.8878	1.2352
2,2-диметилбутан	0.3750	0.4125	0.4875	0.6375	0.8625	1.2000
<i>n</i> -октан	0.5110	0.5631	0.6653	0.8687	1.1753	1.6352
2,3-диметилбутан	0.3860	0.4246	0.5018	0.6562	0.8878	1.2352
2,2-диметилбутан	0.3750	0.4125	0.4875	0.6375	0.8625	1.2000
<i>n</i> -октан	0.5110	0.5631	0.6653	0.8687	1.1753	1.6352
2,2,3-триметилпентан	0.5640	0.6215	0.7343	0.9588	1.2972	1.2408
2,2,4-триметилпентан	0.4670	0.5146	0.6080	0.7939	1.0741	1.4944
2,3,3-триметилпентан	0.6020	0.6634	0.7838	1.0234	1.3846	1.9264
2,3,4-триметилпентан	0.5670	0.6248	0.7382	0.9639	1.3041	1.8144
3-метил,3-этилпентан	0.5250	0.5785	0.6835	0.8925	1.2075	1.6800
2-метилгептан	0.4530	0.4992	0.5898	0.7701	1.0419	1.4496
3-метилгептан	0.4540	0.5003	0.5911	0.7718	1.0442	1.4528
4-метилгептан	0.4470	0.4925	0.5819	0.7599	1.0281	1.4304
2,2-диметилгексан	0.4990	0.5498	0.6496	0.8483	1.1477	1.5968
2,3-диметилгексан	0.4670	0.5146	0.6080	0.7939	1.0741	1.4944
2,5-диметилгексан	0.4590	0.5058	0.5976	0.7803	1.0557	1.4688
3,3-диметилгексан	0.4750	0.5234	0.6184	0.8075	1.0925	1.5200
3,4-диметилгексан	0.4630	0.5102	0.6028	0.7871	1.0649	1.4816
3-этилгексан	0.4250	0.4683	0.5533	0.7225	0.9775	1.3600

Анализируя таблицу 3.2 можно заметить, что изменение вязкости приведённых веществ в диапазоне давлений от 0.1МПа до 200МПа в среднем составляет три раза.

Полученные экспериментально значения вязкости и закономерности разброса вязкости изомеров в интервале от 0.1МПа до 50МПа соответствуют данным, приведенным Carl L Yaws в работах [85]. В целях упрощения процесса расчета Ван-дер-Ваальсовых объемов углеводородных цепей и адаптации теоретических основ квантовой химии к инженерной практике, моделирование и расчет деформаций молекулярных цепей производили в компьютерных программных пакетах Chemcraft и UCSF Chimera (таблица 3.3, 3.4) (см. приложение Б).

Таблица 3.3 –Изменение плотности

Плотность ρ в г/см³

Вещество	$\rho_{норм}$	$\rho_{струк}$					М, г/моль
	при давлении, атм						
	1	100	500	1000	1500	2000	
Полидиметилсилоксан	0.9680	0.9770	1.0160	1.0357	1.0599	1.0793	236.12
<i>n</i> -гексан	0,6600	0.6626	0.6659	0.6957	0.7076	0.7235	86.18
2- метилпентан	0,6599	0.6625	0.6684	0.6956	0.7075	0.7234	86.18
3- метилпентан	0,6599	0.6625	0.6684	0.6956	0.7075	0.7234	86.18
2,2-диметилбутан	0,6610	0.6636	0.6669	0.6968	0.7087	0.7246	86.18
2,3-диметилбутан	0,6720	0.6746	0.6780	0.7084	0.7205	0.7367	86.18
<i>n</i> -октан	0,7030	0.7051	0.7086	0.7396	0.7523	0.7692	114.22
2,2,3-триметилпентан	0.7160	0.7181	0.7217	0.7533	0.7662	0.7691	114.22
2,2,4-триметилпентан	0.6900	0.6920	0.6955	0.7260	0.7384	0.7550	114.22
2,3,3-триметилпентан	0.7260	0.7281	0.7318	0.7638	0.7769	0.7944	114.22
2,3,4-триметилпентан	0.7190	0.7193	0.7247	0.7565	0.7694	0.7868	114.22
3-метил,3-этилпентан	0.7190	0.7193	0.7247	0.7565	0.7694	0.7868	114.22
2-метилгептан	0.6980	0.7000	0.7035	0.7344	0.7469	0.7638	114.22
3-метилгептан	0.7070	0.7091	0.7126	0.7439	0.7566	0.7736	114.22
4-метилгептан	0.7040	0.7061	0.7096	0.7407	0.7534	0.7703	114.22
2,2-диметилгексан	0.6930	0.6950	0.6985	0.7291	0.7416	0.7583	114.22
2,3-диметилгексан	0.7190	0.7193	0.7247	0.7565	0.7694	0.7868	114.22
2,4-диметилгексан	0.6960	0.6980	0.7015	0.7323	0.7448	0.7616	114.22
2,5-диметилгексан	0.6940	0.6960	0.6995	0.7302	0.7427	0.7594	114.22
3,3-диметилгексан	0.6930	0.6950	0.6985	0.7291	0.7416	0.7583	114.22
3,4-диметилгексан	0.7150	0.7171	0.7207	0.7523	0.7651	0.7824	114.22
3-этилгексан	0.7130	0.7151	0.7187	0.7502	0.7630	0.7802	114.22

Таблица 3.3 хорошо иллюстрирует, что с увеличением углеродного скелета в гомологическом ряду у вещества растет изомерия, следовательно, повышается у изомеров разброс в плотностях и значениях коэффициентов молекулярной упаковки сред, то есть и в значениях модулей упругости углеводородных сред до определенных величин механических силовых полей, так как при сверхвысоких давлениях коэффициенты сжимаемости различных жидких сред становятся практически одинаковыми [202].

Таблица 3.4 – Средний коэффициент сжимаемости

Вещество	При давлении, атм					
	1	100	500	1000	1500	2000
Полидиметилсилоксан	0.65	0.650	0.650	0.652	0.656	0.664
<i>n</i> -гексан	0.520	0.520	0.520	0.530	0.537	0.540
2- метилпентан	0.520	0.520	0.520	0.530	0.537	0.540
3- метилпентан	0.520	0.520	0.520	0.530	0.537	0.540
2,2-диметилбутан	0.520	0.520	0.520	0.530	0.537	0.540
2,3-диметилбутан	0.530	0.530	0.530	0.54	0.547	0.550
<i>n</i> -октан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
2,2,3-триметилпентан	0.570	0.570	0.570	0.58	0.587	0.589
2,2,4-триметилпентан	0.540	0.540	0.540	0.55	0.557	0.560
2,3,3-триметилпентан	0.580	0.580	0.580	0.59	0.597	0.600
2,3,4-триметилпентан	0.570	0.570	0.570	0.58	0.587	0.589
3-метил,3-этилпентан	0.560	0.560	0.560	0.57	0.577	0.580
2-метилгептан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
3-метилгептан	0.560	0.560	0.560	0.57	0.577	0.580
4-метилгептан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
2,2-диметилгексан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
2,3-диметилгексан	0.570	0.570	0.570	0.58	0.587	0.589
2,4-диметилгексан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
2,5-диметилгексан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
3,3-диметилгексан	0.550	0.550	0.550	0.56	0.567	0.570
3,4-диметилгексан	0.570	0.570	0.570	0.58	0.587	0.589
3-этилгексан	0.560	0.560	0.560	0.57	0.577	0.580

Это является следствием уменьшения расстояния между частицами жидкой среды и ростом составляющей Ван-дер-Ваальсовых сил – сил отталкивания между частицами, что затрудняет дальнейшее их сближение. Поэтому при достижении значительных давлений уменьшение объема среды может происходить также за счет деформации структур самих молекул (таблица 3.5).

Более энергетически выгодным процессом деформации молекулярной цепи является деформация за счет изменения углов связи в структуре, в данном случае изменения углов связей атомов углерода, углеродного скелета молекулы (таблица 3.6-3.7).

Таблица 3.5 – Деформация углеродной цепи на примере молекулы *n*-гексана

Вещество	Y_1	Y_{100}	Y_{500}	Y_{1000}	Y_{1500}	Y_{2000}
Полидиметилсилоксан	0.0981	0.0990	0.1027	0.1042	0.1058	0.1063
<i>n</i> -гексан	0.0806	0.0809	0.0813	0.0833	0.0836	0.0848
2-метилпентан	0.0909	0.0912	0.0917	0.0946	0.0949	0.0963
3-метилпентан	0.0908	0.0911	0.0916	0.0944	0.0947	0.0961
2,2-диметилбутан	0.1064	0.1068	0.1073	0.1114	0.1119	0.1135
2,3-диметилбутан	0.1073	0.1077	0.1082	0.1115	0.1119	0.1165
<i>n</i> -октан	0.0654	0.0656	0.0659	0.0680	0.0683	0.0693
2,2,3-триметилпентан	0.0940	0.0942	0.0947	0.0981	0.0986	0.0986
2,2,4-триметилпентан	0.0924	0.0926	0.0931	0.0964	0.0967	0.0982
2,3,3-триметилпентан	0.0935	0.0937	0.0942	0.0968	0.0973	0.0988
2,3,4-триметилпентан	0.0929	0.0931	0.0936	0.0964	0.0968	0.0985
3-метил,3-этилпентан	0.0921	0.0923	0.0928	0.0964	0.0968	0.0983
2-метилгептан	0.0707	0.0709	0.0712	0.0704	0.0743	0.0754
3-метилгептан	0.0701	0.0703	0.0706	0.0725	0.0728	0.0739
4-метилгептан	0.0700	0.0702	0.0705	0.0732	0.0735	0.0746
2,2-диметилгексан	0.0835	0.0837	0.0841	0.0870	0.0874	0.0887
2,3-диметилгексан	0.0841	0.0843	0.0847	0.0869	0.0873	0.0889
2,4-диметилгексан	0.0848	0.0850	0.0854	0.0886	0.0890	0.0904
2,5-диметилгексан	0.0847	0.0849	0.0853	0.0882	0.0886	0.0899
3,3-диметилгексан	0.0828	0.0830	0.0834	0.0853	0.0859	0.0873
3,4-диметилгексан	0.0849	0.0851	0.0855	0.0881	0.0885	0.0901
3-этилгексан	0.0838	0.0840	0.0844	0.0872	0.0885	0.0889

Таблицы 3.6-3.8 иллюстрирует, что с ростом изомерии вещества повышается разброс в значениях объемов молекул, то есть повышается разброс и в значениях Ван-дер-Ваальсовых объемов. Так как технические углеводороды представляют собой смесь различных изомеров вещества, это приводит к некоторым различиям в степени сжимаемости жидкой среды (в модуле упругости) в зависимости от того, какая изомерная структура преобладает в рабочей среде [208].

Очевидно, что неоднородность сжимаемости жидкой среды оказывает влияние на время ее релаксации, которое будет отличаться от времени релаксации химически чистых ее компонентов. Анализируя полученные значения видно, что именно деформация цепей оказывает определяющее воздействие на изменение вязкости веществ. Также полученные результаты свидетельствуют о наличии существенной зависимости численных значений Ван-дер-Ваальсовых объемов углеводородных цепей компонентов рабочих сред от рабочих давлений

Таблица 3.6 – Изменение угловой связи атомов углерода

Вещество	$l_{\text{молекулы}}, \text{ \AA}, \text{ при давлении, атм}$					
	1	100	500	1000	1500	2000
Полидиметилсилоксан	10.765	10.664	10.255	10.090	9.920	9.860
<i>n</i> -гексан	8.751	8.732	8.709	8.458	8.425	8.287
2- метилпентан	7.817	7.800	7.779	7.497	7.469	7.345
3- метилпентан	7.817	7.800	7.779	7.505	7.477	7.353
2,2-диметилбутан	6.595	6.580	6.563	6.280	6.254	6.151
2,3-диметилбутан	6.595	6.581	6.564	6.332	6.308	6.204
<i>n</i> -октан	11.156	11.137	11.106	10.709	10.660	10.481
2,2,3-триметилпентан	7.817	7.803	7.781	7.470	7.433	7.430
2,2,4-триметилпентан	7.817	7.803	7.783	7.478	7.445	7.321
2,3,3-триметилпентан	7.817	7.803	7.780	7.534	7.495	7.367
2,3,4-триметилпентан	7.817	7.803	7.781	7.523	7.485	7.345
3-метил,3-этилпентан	7.817	7.803	7.781	7.452	7.417	7.290
2-метилгептан	10.480	10.462	10.433	9.991	9.946	9.778
3-метилгептан	10.480	10.461	10.432	10.119	10.071	9.902
4-метилгептан	10.480	10.462	10.433	9.992	9.946	9.779
2,2-диметилгексан	8.751	8.736	8.712	8.376	8.337	8.197
2,3-диметилгексан	8.751	8.735	8.710	8.450	8.408	8.250
2,4-диметилгексан	8.751	8.736	8.712	8.350	8.312	8.172
2,5-диметилгексан	8.751	8.736	8.712	8.385	8.347	8.206
3,3-диметилгексан	8.751	8.736	8.712	8.453	8.415	8.273
3,4-диметилгексан	8.751	8.736	8.710	8.413	8.372	8.214
3-этилгексан	8.751	8.735	8.711	8.396	8.255	8.214

Таблица 3.7 – Изомерия вещества

Вещество	$\sum S, \text{ \AA}^2 \text{ при давлении}$					
	1	100	500	1000	1500	2000
Полидиметилсилоксан	249.30	247.09	238.19	234.76	231.21	230.13
<i>n</i> -гексан	159.74	159.30	158.55	154.73	154.18	151.99
2- метилпентан	159.97	159.53	158.66	153.73	153.24	151.02
3- метилпентан	159.91	159.59	158.72	153.89	153.40	151.17
2,2-диметилбутан	163.23	162.82	161.93	155.93	155.23	153.03
2,3-диметилбутан	160.07	159.77	158.91	154.17	153.61	147.55
<i>n</i> -октан	204.91	204.58	203.74	197.20	196.34	193.50
2,2,3-триметилпентан	207.90	207.52	206.43	199.27	198.27	198.26
2,2,4-триметилпентан	207.90	207.68	206.56	199.32	198.72	195.68
2,3,3-триметилпентан	207.90	207.53	206.45	200.89	199.86	196.81
2,3,4-триметилпентан	207.90	207.65	206.52	200.52	199.71	196.25
3-метил,3-этилпентан	208.07	207.77	206.67	198.93	198.11	195.10
2-метилгептан	204.74	204.38	203.54	205.62	194.83	191.98
3-метилгептан	204.74	204.40	203.55	198.09	197.28	194.32
4-метилгептан	204.74	204.56	203.71	196.05	195.25	192.38
2,2-диметилгексан	208.07	207.85	207.00	199.91	199.01	196.08
2,3-диметилгексан	204.58	204.26	203.40	198.03	197.13	193.58
2,4-диметилгексан	204.60	204.51	203.40	196.05	195.18	192.15
2,5-диметилгексан	204.78	204.52	203.40	196.68	195.79	192.97
3,3-диметилгексан	208.07	207.65	206.79	202.04	200.61	197.40
3,4-диметилгексан	204.58	204.36	203.49	197.29	196.40	192.92

Таблица 3.8 – Объем вещества

Вещество	$\sum \Delta V_i, \text{Å}^3$, при давлении, атм					
	1	100	500	1000	1500	2000
Полидиметилсилоксан	263.34	260.86	250.84	246.83	242.67	241.21
<i>n</i> -гексан	112.79	112.55	112.26	109.02	108.60	106.81
2- метилпентан	113.67	113.43	113.13	109.03	108.62	106.82
3- метилпентан	113.55	113.31	113.01	109.03	108.62	106.82
2,2-диметилбутан	114.55	114.30	114.00	109.09	108.64	106.84
2,3-диметилбутан	113.36	113.12	112.83	108.85	108.43	106.65
<i>n</i> -октан	149.60	149.35	148.94	143.61	142.95	140.55
2,2,3-триметилпентан	152.80	152.53	152.10	146.03	145.31	145.25
2,2,4-триметилпентан	150.20	149.95	149.55	143.69	143.07	140.68
2,3,3-триметилпентан	152.00	151.73	151.29	146.51	145.75	143.25
2,3,4-триметилпентан	151.10	150.84	150.41	145.42	144.70	141.98
3-метил,3-этилпентан	149.90	149.64	149.22	142.91	142.24	139.81
2-метилгептан	151.70	151.45	151.03	144.63	143.98	141.54
3-метилгептан	150.50	150.24	149.82	145.33	144.64	142.20
4-метилгептан	150.40	150.15	149.73	143.40	142.74	140.35
2,2-диметилгексан	152.20	151.94	151.53	145.68	145.01	142.57
2,3-диметилгексан	150.60	150.34	149.91	145.42	144.70	141.98
2,4-диметилгексан	152.00	151.75	151.33	145.04	144.39	141.95
2,5-диметилгексан	151.80	151.55	151.13	145.46	144.80	142.36
3,3-диметилгексан	150.80	150.55	150.13	145.68	145.01	142.57
3,4-диметилгексан	152.10	151.84	151.40	146.23	145.52	142.78
3-этилгексан	150.20	149.94	149.52	144.11	141.69	141.00

Впервые расчётным путём получены значения параметров базовых углеводородов, входящих в состав рабочих жидкостей, позволяющие формировать базу данных для математических моделей при отсутствии экспериментальных данных в диапазонах давлений до 200МПа.

Очевидна зависимость релаксационных процессов углеводородных цепей от степени изменения значений их Ван-дер-Ваальсовых объемов, следовательно, это также свидетельствует о зависимости скорости релаксационных процессов молекул рабочих сред от рабочих давлений систем. Именно релаксационные процессы лежат в основе некоторых неньютоновских свойств жидких сред и значительного числа реологических аномалий, возникающих в системах высокого давления.

Для установления численных критериев данной зависимости рассмотрим подробнее гидродинамику и релаксационные процессы, присущие многокомпонентным углеводородным реологическим системам в условиях высокого давления.

Для начала запишем уравнения, требуемые для расчета основных параметров.

Молекулярный вес цепи рассчитываем по формуле Свенберга [95]:

$$M = \frac{SRT}{D(1 - V_{y\partial}\gamma)}, \quad (3.49)$$

где S – константа седиментации; R – газовая постоянная; T – температура; D – коэффициент диффузии; $V_{y\partial}$ – удельный объем полимера;

$$V_{y\partial} = V_{\text{пик}} \left[\frac{1}{m_0} - \frac{100}{P \left(\frac{1}{m_0} - \frac{1}{m} \right)} \right]; \quad (3.50)$$

γ – удельный вес полимера; $V_{\text{пик}}$ – объем пикнометра; m_0 и m – соответственно масса растворителя и раствора;

$$\frac{P}{100} = \frac{\mu V}{m}; \quad (3.51)$$

μ – концентрация.

Характеристическая вязкость [207]

$$[\eta] = K_\eta M^{\alpha_\eta}, \quad (3.52)$$

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

Выражающая отношение гидродинамических диффузионных и вязкостных радиусов макромолекул константа [95]

$$A = \eta_0 T^{-1} D (M [\eta])^{1/3}, \quad (3.53)$$

η_0 – вязкость растворителя, M – молекулярный вес полимерной цепи;

$$A = 3,44 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/град.}$$

Принимая во внимание многодисперсность исследуемого раствора, перепишем ряд физических параметров.

Учитывая аддитивные вязкостные свойства разбавленного раствора, константы K_η и α_η не зависят от молекулярной массы.

Вязкость раствора полидисперсного полимера можно записать как функцию от концентрации: $\eta = f(C)$, или [96]

$$[\eta] = \sum_i K_\eta M_i^{\alpha_\eta} C_i. \quad (3.54)$$

Взаимосвязь модулей упругости полидисперсных смесей [95, 209]:

$$m = \frac{E_d}{E_M}. \quad (3.55)$$

Здесь E_d и E_M – соответственно модуль упругости дисперсной фазы и матрицы.

Модуль упругости двухкомпонентной дисперсной системы [95]

$$E_0 = E_M \left[1 + \frac{V_d}{\left[\frac{m}{m-1} - \sqrt[3]{V_d} \right]} \right], \quad (3.56)$$

где V_d – объемное содержание дисперсных частиц.

Модуль упругости трехкомпонентной дисперсной системы

$$E_0 = E_M \left(1 - V_{M_d}^{2/3} \right) \left[1 + \frac{V_d}{\left[\frac{m}{(m+V_{M_d}^{2/3}-1)} - \sqrt[3]{V_d} \right]} \right], \quad (3.57)$$

V_{M_d} – объемное содержание более мелкодисперсных частиц.

Полученные данные позволяют моделировать процессы, протекающие в «больших» объёмах. Моделирование процессов протекающих в «малых» объёмах,

где влиянием на точность расчётов вязкости электрохимических процессов уже нельзя пренебрегать, требует отдельного рассмотрения.

3.4 Моделирование электрохимических процессов в граничных слоях щелевых каналах высоконагруженного оборудования

Особый интерес при эксплуатации пар трения представляют электрохимические процессы.

Исследование влияния электрических потенциалов трибологической системы в коррозионно-активных средах и растворах электролитов на процессы трения [171] показало наличие существенной зависимости физических свойств пленок, образующихся на поверхностях пар трения, от разности электрических потенциалов системы на зачищенных поверхностях и поверхностях, образующихся при их трении. В трибологических системах с близкими значениями электрических потенциалов зачищенных поверхностей и поверхностей, образовавшихся при их трении, удаление пленок под действием сдвиговых напряжений происходит значительно проще, чем в системах с достаточно большой разницей данных потенциалов [210, 211].

Трение металлических поверхностей в целом является электродным многостадийным процессом, приводящим к их электродной поляризации [212, 213].

При рассмотрении поляризационных кривых, полученных в ходе различных независимых исследований [69, 212], отслеживается закономерность сдвига поляризационных кривых трибологических систем, образующихся при трении относительно поляризационных кривых, образующихся в статике. Причем значительные сдвиги электрических потенциалов как в катодную, так и в анодную области приводили к росту момента трения. В анодной области износ выражено снижался только при нулевом значении электрического потенциала, а в катодной области, несмотря на значительный рост микротвердости поверхностей трения, наблюдалось снижение износа данных поверхностей.

Полученные исследователями результаты подтверждают существование эффекта торможения течения электродных процессов за счет образования адсорбционных слоев [214].

Различия поверхностных энергий пар трения и кинетики электрохимических процессов приводят к существенной разнице механических свойств адсорбционных пленок и поверхностных слоев металлов, что вызывает трансформации дислокационной структуры и способствует изменению реологического сопротивления в контакте и жесткости его поверхностей, меняя отношение значений упругой и пластической деформаций, модулируя спектр амплитудно-частотных автоколебаний [219, 220].

Учитывая электрохимические процессы, протекающие в парах трения, и присутствие химически активных веществ в смазочной среде, не стоит забывать о возможности коррозирования поверхностей металлов.

Особенно подвержены коррозии пары трения, образованные из разнородных металлов, которые в коррозионно-активных средах образуют коррозионные макроэлементы с определенным значением электрического потенциала. Принимая во внимание импульсный характер нагружения пар трения [204], кинетика данного процесса будет неоднородна и многостадийна. Первоначальный характер адсорбции определяется установившимся значением электрического потенциала, но по мере снижения поверхностной энергии процесс адсорбции несколько замедляется. При этом скорость протекающих процессов неоднородна во многом из-за изменения значений электрического потенциала вследствие импульсности нагружения, а снижение поверхностных барьеров приводит, в свою очередь, к выходу существующих дислокаций на поверхность контакта [51].

Непосредственное влияние на течение процессов адсорбции оказывают физико-химические свойства жидких сред, смачивающих твердые поверхности пар трения.

Наиболее активными адсорбционными соединениями являются органические кислоты, металлические мыла органических кислот, смолы и спирты [167].

В молекулах подобных поверхностно-активных веществ имеет место некоторое несовпадение центров тяжести положительных и отрицательных зарядов, причем данный эффект пространственного разделения инородных зарядов присутствует даже в изолированном состоянии. Это приводит к возможности образования адсорбционных насыщенных слоев с плотно расположенными друг к другу молекулярными цепями, молекулы в которых ориентированы строго параллельно относительно соседних и присоединенными активным или полярным концом молекулярной цепи нормально к металлической поверхности, В случае органических кислот и их мыл активностью обладают COOH – карбоксильные группы, а у спиртов OH – гидроксильные группы [167].

Рассматривая адсорбционные слои, не стоит забывать и о том, что поверхностно-активные вещества обладают еще одной характерной особенностью, а именно: в адсорбированном состоянии на поверхности твердого тела они способны перемещаться по поверхности металла, образуя равномерное покрытие, компенсируя участки избытка и недостатка вещества, создавая на поверхности металла слой с особыми трибологическими свойствами. При этом в процессе хемосорбции полярные концы молекулярных цепей образуют с металлической решеткой материала поверхности трения граничный монослой, которому присуще наличие химических связей углеводород-металл, что приводит к ориентации в пространстве молекул граничного слоя и ограничению количества их степеней свободы.

Исходя из теории граничного трения, структуры адсорбционных слоев, а также линейных размеров рассматриваемой проточной части при трении прецизионных пар в малых зазорах, образуемых ими, допускается соприкосновение адсорбционных полислоев, расположенных на противоположных поверхностях. Поэтому с ростом давления и при уплотнении молекулярной структуры возможно образование полимерных сшивок

адсорбционных слоев, расположенных на противоположных поверхностях трения.

Также очевидно, что при условии присутствия в рабочей среде сшивающего агента, компонента присадки, возможно образование сшивок данных адсорбционных слоев по классическому механизму химической сшивки полимерных структур.

Нередко залипание прецизионных пар трения в состоянии покоя является следствием упорядочения молекулярной структуры и взаимной ориентации молекул по дипольному механизму.

Также залипание пар трения возможно при истечении из зазора более низкомолекулярных компонентов. При этом в зазоре сохраняется полимерная высокомолекулярная матрица, обладающая более высокой вязкостью и неньютоновскими свойствами – дилатантными, вязкоупругими.

В ряде источников [190] приводится значительное различие значений электрического потенциала поверхности трения в статических условиях и в условиях сдвиговых нагрузений, что прежде всего связано с зачисткой поверхностных пленок и новых структур, а также пластической деформацией поверхностей контакта [206].

Как было показано выше, процессы, протекающие в парах трения, носят импульсный характер. Поэтому необходимо рассматривать не только величину смещения электрических потенциалов металлических поверхностей, но и следует описывать параметры колебаний значений электрических потенциалов. Принято выделять постоянную и переменную составляющие электрических потенциалов, образующихся при трении поверхностей. Возникновение переменной составляющей электрических потенциалов объясняют наличием шероховатости поверхностей скольжения, то есть изменением межэлектродного зазора и давления, вследствие этого гидродинамического давления, а также скоростей скольжения поверхностей. Эти параметры значительно влияют на образования адсорбционного слоя и процессы граничного трения [55].

Очевидно, что на данные электрохимические процессы в системах высокого давления будут оказывать влияние рабочие давления, способные инициировать различные физико-химические явления, как химические, так и структурные трансформации.

Необходимо при описании образования адсорбционного слоя учитывать и то, что процесс адсорбции частиц на электродах протекает с конечной скоростью и его течение оптимально при низких значениях электрических потенциалов металлических поверхностей. При достаточно высоких значениях электрических потенциалов металлических поверхностей начинает превалировать электростатическое зарядение граничного слоя как конденсатора. Поэтому при трении металлов наблюдается локализованная адсорбция, зависящая от значений электрических потенциалов металлических поверхностей.

При рассмотрении электрохимических процессов в системах высокого давления на границе раздела фаз заслуживает внимания механическая модель двойного электрического слоя, образующая при контакте двух фаз, хотя бы одна из которых является жидкой, двойной электрический слой (рисунок 3.1).

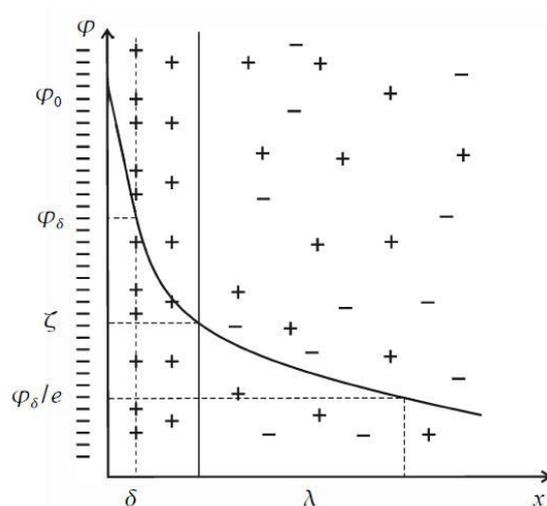


Рисунок 3.1 – Модель двойного электрического слоя [95]

Подобный эффект достигается стремлением системы к состоянию минимума энергии, то есть стремлением системы уменьшить поверхностную энергию в месте контакта, что приводит к принудительной ориентации частиц на

поверхности раздела фаз и приданию контактирующим фазам зарядов противоположного знака равной величины.

На сегодняшний день описаны следующие механизмы образования двойного электрического слоя:

- поверхностная ионизация – процесс перехода ионов или электронов одной фазы к другой, знак заряда поверхности определяет правило Фаянса–Панета;
- превалирующая адсорбция в межфазном слое ионов одного знака;
- ориентация полярных молекул в поверхностном слое, знак заряда поверхности определяет правило Кена – из двух соприкасающихся фаз положительно заряжается фаза, имеющая большую диэлектрическую проницаемость [145].

В общем, данная модель описывает эффект упругого заряжения, возникающий при воздействии на двойной слой периодической механической силы, что приводит к изменению значений электрических потенциалов с частотой, равной частоте возбуждения [55].

Данная модель интересна при рассмотрении пар трения в системах высокого давления, прежде всего тем, что воздействие на двойной слой периодической механической силы может оказываться как со стороны электрода – металлической поверхности, так и со стороны жидкости – рабочей среды. То есть, она позволяет учитывать изменения значений электрических потенциалов металлических поверхностей под действием рабочих давлений, а также учитывать влияние перепадов давления в системе на процессы граничного трения.

Таким образом отслеживая изменение диэлектрической проницаемости зазора можно и физикохимических процессах проходящих в зазорах и судить об вязкости среды в зазоре. Без чего невозможно производить моделирование в малых зазорах.

Принимая во внимание характер нагрузки в опорах скольжения, высокие импульсные нагрузки с определенной частотой, эта модель незаменима при описании гидродинамики их рабочих процессов [223, 224].

Очевидно, что подобные электрохимические эффекты в парах трения являются следствием изменения концентрации полярных молекул в граничном слое, что можно отследить по изменению диэлектрической проницаемости. Кроме того, под действием высоких давлений, возникающих при их нагружении, возможны процессы фазовых переходов, что также отражается на диэлектрической проницаемости среды. Используя метод контроля диэлектрической проницаемости можно диагностировать состояние рабочей среды в зазорах быстродействующего оборудования со скоростями до 10 м/с.

Следовательно, необходимо рассматривать изменения диэлектрической проницаемости смазочной среды в системах, которым присущи интенсивные механические силовые поля, а также оценивать влияние механических полей на изменение электрических потенциалов рассматриваемых зазорах пар трения металлургических агрегатов.

Ряд исследований [69] показывает существенное падение диэлектрической проницаемости с ростом давления на несколько порядков при импульсной нагрузке. Подобное явление возникает вследствие отсутствия возможности переориентации диполей молекул жидкой среды во внешних импульсных механических полях, то есть отсутствия вклада ориентационной поляризации в полную поляризацию. Результаты получены [85] для раствора полиметилсилоксана (ПМС-2500) при температуре 20⁰ и частоте 800 Гц (рисунок 3.2). Кривая ϵ ярко иллюстрирует наличие электрических потерь в исследуемой среде.

При исследовании электрохимических и релаксационных процессов использовалось явление диэлектрической релаксации, которая для жидкостей считается пропорциональной вязкости [224]:

$$\tau_{\partial\partial} = \frac{4\pi R^3}{kT} \eta, \quad (3.57)$$

где k – постоянная Больцмана, R – радиус молекулы, или с учетом источника [225]

$$\tau_{\text{дз}} = \frac{1}{2\pi\nu_{\tau_{\text{дз}}}} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_{\infty}}}; \quad (3.58)$$

ε – статическая диэлектрическая проницаемость; $\nu_{\tau_{\text{дз}}}$ – частота источника, которая соответствует максимуму тангенса угла диэлектрических потерь жидкой среды; $\varepsilon'_{\infty} = 1,1n^2$ – неполярная составляющая диэлектрической проницаемости; n – показатель преломления среды.

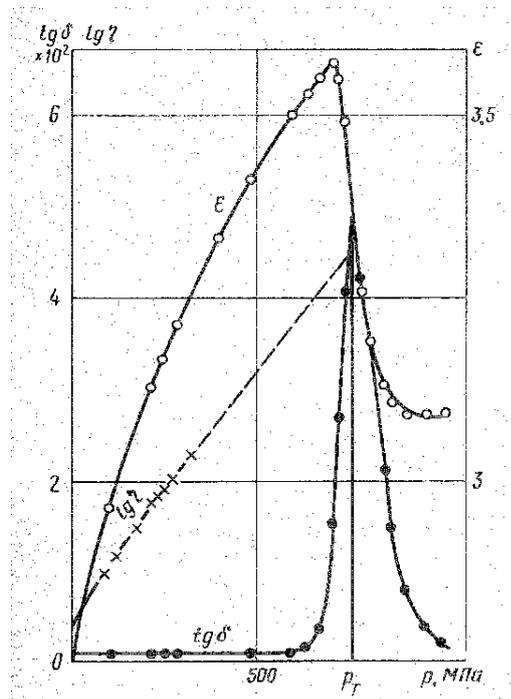


Рисунок 3.2 – Изменение диэлектрической проницаемости раствора полиметилсилоксана (ПМС-2500) [69]

Для расчета диэлектрических эффектов с учетом изменений диэлектрической проницаемости среды применимо уравнение (в статике) Клаузиуса-Мосотти для неполярных сферических молекул, находящихся на достаточно большом расстоянии в неассоциированных жидкостях:

$$\frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N_A \alpha, \quad (3.59)$$

где ε_0 – статическая диэлектрическая постоянная; M – молекулярная масса; N_A – число Авогадро; α – молекулярная поляризуемость.

Для моделирования параметров течения рабочих сред в зазорах высоконагруженных металлургических агрегатов использования этого метода позволяет экспериментально определить границы применения зон «больших» и «малых» зазоров при диагностике металлургического оборудования. Экспериментальные данные, показывают необходимость учёта граничных факторов при размере с эквивалентного гидравлического диаметра щелевого канала до 10 мкм. Оборудование реализующее, данный метод контроля позволяет не только диагностировать состояние рабочих сред, но и экспериментально определять величины коэффициентов трения в малых зазорах. Необходимость определения параметров рабочих сред привела к созданию ряда экспериментальных установок описанных в главе 4 и применённых в комплексе комбинированной диагностики.

Для реализации комплекса математического моделирования был использован программный пакет ANSYS, с предварительно интегрированной в программный алгоритм модернизированной моделью течения жидкой среды.

3.5 Выводы по главе

1. Обоснованы основные положения предложенной для моделирования процессов в металлургических высоконагруженных агрегатах модернизированной модели течения рабочей среды, использующей для выражения турбулентной вязкости кинетическую энергию турбулентности E и масштаб турбулентности L для условий воздействий, характерных для высоконагруженных узлов. Приведены корректирующие коэффициенты применённой модели. Научно обосновано использование метода коррекции объёмной вязкости применительно к моделям E - L типа для описания поведения сред подвергающихся физико-химическому воздействию при давлениях свыше 50 МПа.
2. Впервые расчётным путём получены значения базовых параметров вязкости, плотности, коэффициента объёмного сжатия углеводородов, входящих в состав рабочих жидкостей в режиме нагружения зазоров

соединения деталей металлургических машин и агрегатов, позволяющие формировать базу данных для математических моделей при отсутствии экспериментальных данных в диапазонах давлений до 200МПа. с использованием расчета деформаций молекулярных цепей в компьютерных программных пакетах Chemcraft и UCSF Chimera.

3. Для оценки вязкости сред в граничных слоях щелевых каналов с эквивалентным гидравлическим диаметром до 10 мкм высоконагруженного оборудования обосновано использование адаптированного метода оценки диэлектрической релаксации.
4. Предложена модель для оценки поведения рабочих сред в высоконагруженных элементах металлургического оборудования как в объемах при воздействии высоких давлений, вызывающих физико-химические процессы, так и в зазорах прецизионных пар трения. Без этой информации крайне затруднительно определение диапазонов использования рабочих жидкостей, обеспечивающих эффективную эксплуатацию техники, оснащенной гидроприводом, и моделирование движения сред.

Глава 4 Разработка диагностических комплексов контроля состояния гидравлических систем металлургических агрегатов и рабочих сред в условиях нагружения высоким давлением

Рассматривая вопросы подбора оборудования для первичной диагностики агрегатов металлургического комплекса, необходимо понимать, что разные типы металлургических машин требуют разного подхода к определению их текущего состояния. Во многом это определяется и поколением оборудования, и его типом. Наиболее типичным оборудованием современных металлургических комбинатов являются машины МНЛЗ и группы специализированных прокатных станов. Анализируя простои оборудования основных цехов ОАО «ПНТЗ», автор фиксировал не одинаковый вклад типов оборудования в экономические потери производства. Анализируя простои, вызванные отказами оборудования, можно выделить простои по вине «энергетического» и «механического» оборудования.

Углублённый анализ основных наиболее критичных простоев показывает неодинаковый вклад компонентов оборудования в производственные потери. Так, анализ простоев электродуговой печи (см. таб. 4.1, таб 4.2) показывает, что основной вклад в простои оборудования вносят элементы систем охлаждения и силовые гидравлические контура. Анализ простоев оборудования 4-го цеха ОАО «ПНТЗ» демонстрирует схожую картину (см. табл. 4.3.). Оценивая особенности работы оборудования этого цеха на примере пресса высадки трубы, хорошо заметно превалирование отказов гидравлического оборудования над отказами механического и теплового, аналогичная ситуация наблюдается и других объектах металлургического комплекса, созданных или модернизированных в течение последних 15 лет.

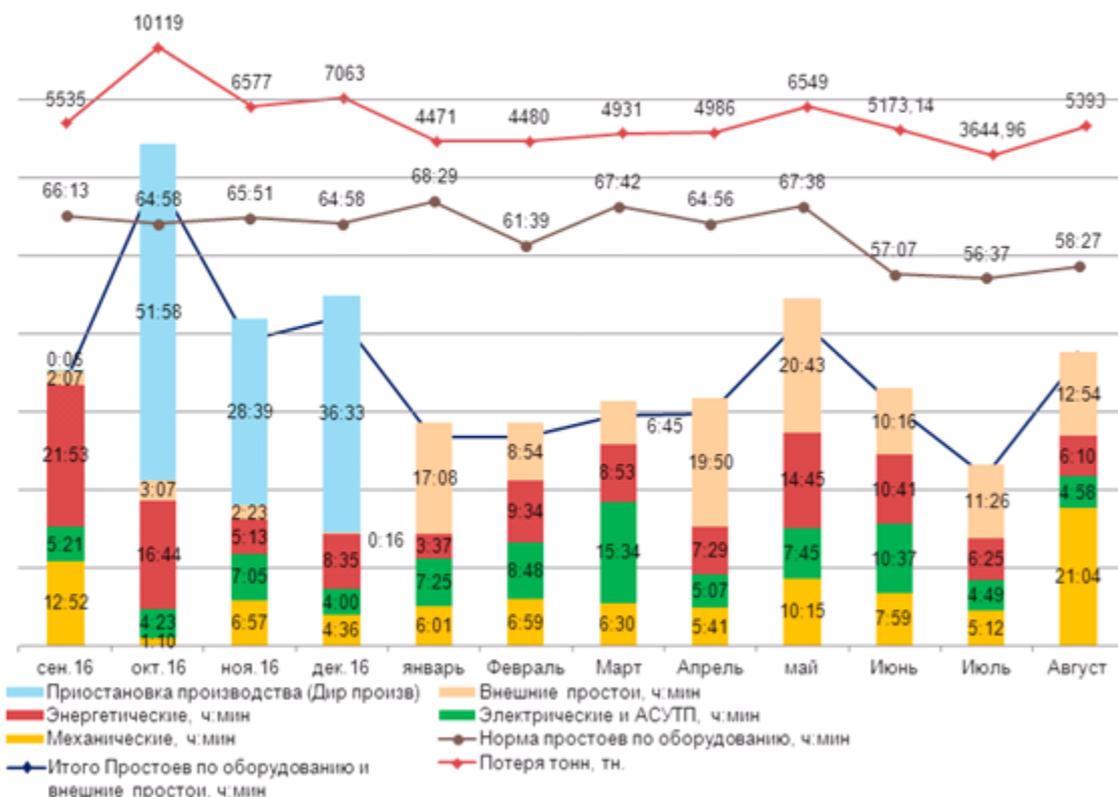


Рис 4.1 Причины простоев по типам оборудования Цеха 23 ОАО «ПНТЗ» за 2016-2017 годы

Причём анализ отказов «электрических» показывает, что до 70% приходится на электрогидравлические системы управления.

Такая ситуация в первую очередь связана с широким внедрением систем гидравлических приводов с пропорциональным и сервоприводом, позволяющим значительно улучшить параметры регулирования объектов [222]. Как уже отмечалось в первой главе, на предприятиях существуют собственные службы диагностики оборудования. Наиболее оснащённые службы диагностики существуют на ОАО «НТМК», ОАО «НЛМК», ЗАО «Механо-ремонтный комплекс» г. Магнитогорск, ООО «Северсталь-Промсервис» г. Череповец, интенсивно развиваются службы диагностики на предприятиях ООО «Завод Интехремонт» г. Ревда, ОАО «ПНТЗ», ОАО «ЧТПЗ», ООО «Ремтехцентр» г. Каменск-Уральский, ООО «Полевской техцентр» г. Полевской и других.

Типовой состав диагностического оборудования, характерного для служб диагностики этих предприятий, представлен на рис 4.2 .

Таблица 4.1

№ п/п	Простои	Общее время	Вид простоя	время	Причина простоя
1	Механические	21:04	неиспр. м/о наклона печи, подъёма свода	20:31	7.08.2017 суммарно 4:55 выброс шлака при завалке, восстановительный ремонт замена РВД – простой не по механикам 12.08.2017 суммарно 6:36 отсутствие требуемого угла наклона печи. Замена клапанов на гидроблоке управления цилиндром. Попадание частиц внутренних уплотнений, поврежденных вследствие возгорания 7.08.2017. 23.08.2017. суммарно 9:00 проход металла по шлаковому поясу со стороны г/ц наклона печи, выход из строя РВД, гидроблок и цилиндр – простой не по механикам
			неиспр. м/о крана #1,2,3	0:33	
2	Электрические и АСУТП	4:58	неиспр. э/о крана #1.2.3	2:56	
			неиспр. э/о наклона печи, подъёма свода	0:44	
			неиспр. э/о ТПСМ	0:19	
			неиспр. э/о скраповоза	0:17	
			нет готовности на включение	0:15	

			печи		
			неиспр э/о газоочистки	0:15	
			неиспр э/о манипулятора MORE	0:08	
			неиспр э/о опускания/под нятия электродов	0:04	

Таблица 4.2

Внеплановые простои по оборудованию за август 2017 года составили 32 час 12 минут (4212 тн);	
Внеплановые простои по технологической службе 34 час 52 мин 4561тн , из них:	6:00 - Ремонт футеровки; - 3:19 - Организация производства; - 2:12 – Обезуглераживание; - 0:55 - Очистка песочницы; - 0:37 - Очистка путей сталевоза; - 0:30 - Извлечение обломков электродов; - 0:30 - Ож. МНЛЗ (устранение аварии); - 0:20 - Вторая подвалка; - 0:16 - Нет замера температуры; - 0:10 - Ожидание АКП (технология); - 0:07 - Прожигание эркерного канала;
По службе энергетика внеплановые простои по оборудованию за август составили 6 часа 11 мин (807 тн) , основные из которых:	- 5:16 – неиспр. системы охлаждения свода панелей печи; - 0:22 - неиспр. системы орошения электродов; - 0:18 - замена рукавов систем охлаждения; 0:14 - неиспр. системы охлаждения газохода;
По службе механика внеплановые простои за август составили 21 часов 04 минут (2756 тн);	20 часов 31 минута - неиспр. м/о наклона печи, подъёма свода - 33 минуты - неиспр. м/о крана
По службе Электрика внеплановые простои по оборудованию за август составили 4 часа 58 минут (650 тн) , основные из которых:	- 2:56 - неиспр. э/о крана #1.2.3; - 0:44 - неиспр. э/о наклона печи, подъёма свода; - 0:19 - неиспр. э/о ТПСМ; - 0:17 - неиспр. э/о скраповоза; - 0:15 - нет готовности на включение печи; - 0:15 - неиспр э/о газоочистки; - 0:08 - неиспр э/о манипулятора MORE; - 0:04 - неиспр э/о опускания/поднятия электродов;
Внешние простои составили 12 часов 54 минут (1688 тн)	- 6:15 - Трамбовка шихты; - 3:46 - Очистка эркера; - 2:08 - Отсутствие, неготовность с/к, п/к (НСК); - 0:42 - Перелив металла в ДСП, с/к; - 0:03 - Ожидание шихты (легковес);
Суммарная потеря производства по причине внеплановых простоев по технологии, оборудованию, внешних простоев составила 10 460 тн.	

Необходимо заметить, что наблюдается существенное различие в выявляемости дефектов оборудования, имеющих разные принципы контроля состояния агрегатов. Наибольший вклад в долю выявляемых дефектов вносят системы вибродиагностики, весьма эффективны системы тепловизионной диагностики и системы анализа масел и рабочих жидкостей (см. рис 4.3).

Таблица 4.3 Расшифровка данных автоматизированной системы управления ПНТЗ

Механизм	Критичность механизма	Узел	Критичность узла	Номенклатурный номер	Наименование ТМЦ	Ед. Изм.	Количество	Цена	Сумма	Вероятность возникновения отказа (согласно матрицы критичности)	Ущерб при невыполнении в кап. ремонт (согласно матрицы критичности)	Критичность оборудования
Клещевой захват А 20	280	Привод поворота клещевого захвата	140	3045817	Распределитель пропорциональный 4/3 4WRKE 16 W8-125L-3X/6EG24K31A1D3V	шт.	1	113 468,29	113468	1 раз в год и чаще	1 333 790,00	140
		Привод зажима трубы	280	3090415	Гидроцилиндр CDH3MP3/40/28/225.0A11/B1CSDBWA M NR: R900999030 (40/28/225)	шт.	6	80989,53	485937	1 раз в 6 месяцев и чаще	1 333 790,00	280
				3045818	Распределитель пропорциональный 4/3 4WRTE 16 V1-125L-4X/6EG24K31A1V	шт.	1	139 152,47	139152	1 раз в 2 года	666 895,00	30
		Привод перемещения клещей	140	3045818	Распределитель пропорциональный 4/3 4WRTE 16 V1-125L-4X/6EG24K31A1V	шт.	1	139 152,47	139152	1 раз в год и чаще	1 333 790,00	140
Гидросистема А61	140	Насос поддержания давления	140	3049037	Насос А А4VSO 40 DRG /10R-VPB13N00	шт.	1	216423,54	216424	1 раз в год и чаще	2 667 580,00	140
				3091047	КЛАПАН LFA 50 DRW2-7X/315V R901184310 (поз.422)	шт.	2	69678,4	139357	1 раз в год и чаще	666 895,00	120
				3091048	КЛАПАН 3WE 6 B9-6X/EG24N9K4V R900957729 (поз.423)	шт.	1	13964,19	13964,2	1 раз в год и чаще	666 895,00	60
		Гидравлический насос	140	3049036	Насос А А4VSO 180 E02 /30R-VPB13N00	шт.	2	513549,3	1027099	1 раз в год и чаще	2 667 580,00	140

Рассматривая задачу разработки оборудования и методики проведения первичной диагностики, необходимо понимать, что первичную диагностику проводит ремонтный персонал цеха, участка совместно с технологическим персоналом.

Данный персонал, как правило, не имеет навыков работы с современными диагностическими комплексами, зато хорошо знаком с проявлениями отказов оборудования. Рассматривая разновидности оборудования для первичной диагностики, наиболее эффективным представляется комплексное использование тепловизионного контроля в комплексе с оценкой объемного распределения температур, системы акустического контроля механического и гидравлического оборудования, системы диагностики электрогидравлических распределителей по величине и характеру токового сигнала, системы контроля состояния жидкости с учётом импульсного возрастания давления.



Рис 4.2 Типовой набор диагностического оборудования служб диагностики предприятий металлургического комплекса.

Комплексный подход на ПНТЗ



Рис 4.2 Вклад разных методов диагностики в раннее выявление предаварийных состояний службой диагностики ОАО «ПНТЗ»

4.1 Разработка системы контроля внутренних температурных полей оборудования по внешним тепловым полям

Методы измерения температуры исследуемого тела можно разделить на две группы. Первая группа – это измерение температуры стенок аппарата или окружающей его среды, так называемой термостатирующей среды; вторая – измерение температуры непосредственно внутри аппарата. Такие измерения проводят при помощи термопар, термометров сопротивления, оптических, фотоэлектрических пирометров и т. д.

При применении термопар прямое измерение температур сред не всегда возможно, в силу конструкционных особенностей оборудования, такого как валки прокатных станов, подшипники, зоны высокого гидростатического давления. Так, в зонах высокого гидростатического давления точность оценки температуры оказалась очень низкой, так как выведенная ими экстраполяция поправки (рисунок 4.3) не учитывает тот факт, что «при различных температурах разные термоспай дают неодинаковые показания в одной и той же среде, причем разность показаний меняется с температурой» (Д. С. Циклис) [67].

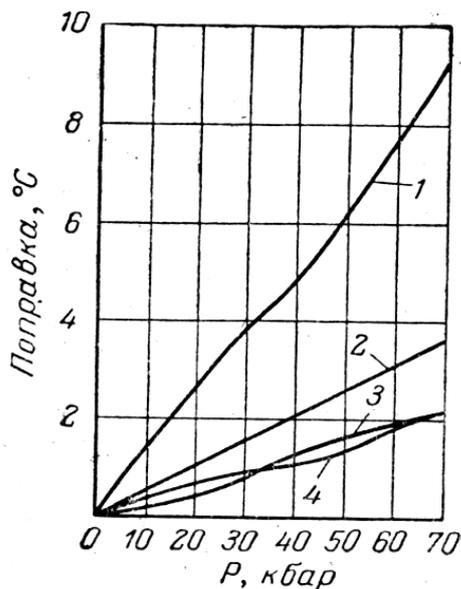


Рисунок 4.3 – Поправки от давления к показаниям термопар: платина–платинородиевой (кривая 1); медь–константановой (кривая 2); никель–никель–молибденовой (кривая 3) и хромель–алюмелевой (кривая 4)

Попытки измерить температуру термисторами не дали положительных результатов вследствие нестабильности этих датчиков при высоком давлении.

Методика определения температуры

Было принято решение проводить расчет объёмного распределения температуры, опираясь на результаты замеров температурных полей наружной поверхности аппарата. Предложенная методика [88] основана на том, что имеем дело с процессом теплообмена через многослойную стенку из материала с известной теплопроводностью при граничных условиях, характеризуемых постоянным коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду применительно диапазону времени равному шагу по временной координате и изменяющейся температурой исследуемой среды внутри аппарата. Зная коэффициент теплопроводности материала корпуса, его зависимость от давления и температуры, начальное распределение температур в установке, геометрию аппарата, можем рассчитывать объёмное распределение температуры объекта в любой момент времени. Такой подход позволяет достаточно легко определить время стабилизации температуры, получить значения изменения температуры на границе внутренней поверхности корпуса как после повышения давления на этапе стабилизации, так и при движении жидкости. Недостатком такого подхода является высокая тепловая инерционность процесса распространения тепла в корпусе аппарата. Подход требует высокой точности определения температур, не ниже десятых долей градуса, чтобы оценить температуру установки с точностью до градуса. Была применена методика оценки температурные полей, описанная в главе 2. Температуру поверхности корпуса определили при помощи тепловизора с разрешающей способностью $0,08^\circ$ [243-246].

Была решена задача определения температуры на границе корпус–исследуемая среда двумя методами: прямым численным моделированием в программном пакете SolidWorks (CosmosWorks) и использованием упрощенного выражения для определения температуры исследуемой среды [245].

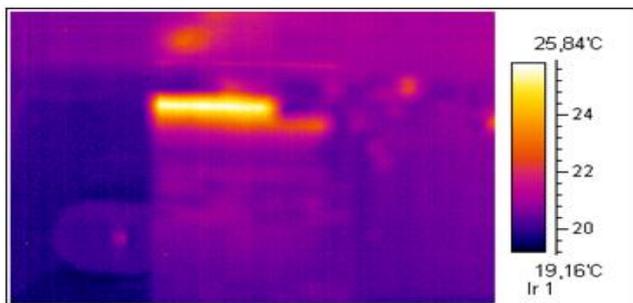
Для подтверждения адекватности разработанного метода измерения температуры был поставлен следующий эксперимент.

Во внутреннюю полость вискозиметра, установленного в вертикальном положении, была помещена откалиброванная термopара таким образом, чтобы

она показывала температуру в зоне контакта рабочей жидкости и внутренней поверхности корпуса. Затем полость с помещенной в нее термопарой была заполнена водой, температура которой составляла 100°C. После этого в течение последующих 15 минут с интервалом в одну минуту делали тепловизионные фотографии внешней поверхности корпуса и проводили запись показаний термопары. Полученные данные представлены на рисунках 4.4-4.11 и в таблице 4.4.

Температура на границе контакта жидкости, в нашем случае горячей воды, и внутренней поверхности корпуса, изготовленный из стали 40, температуропроводность которой равна 13,3 мм²/с,

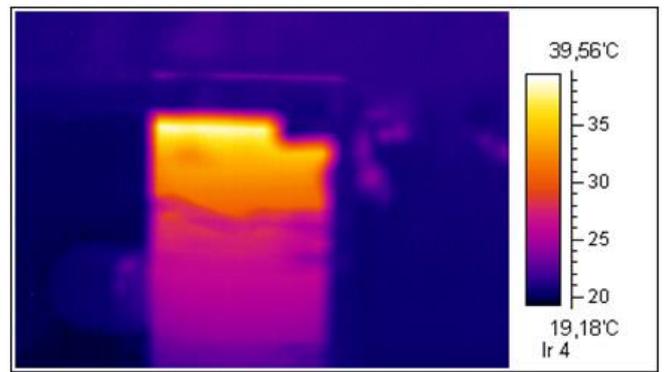
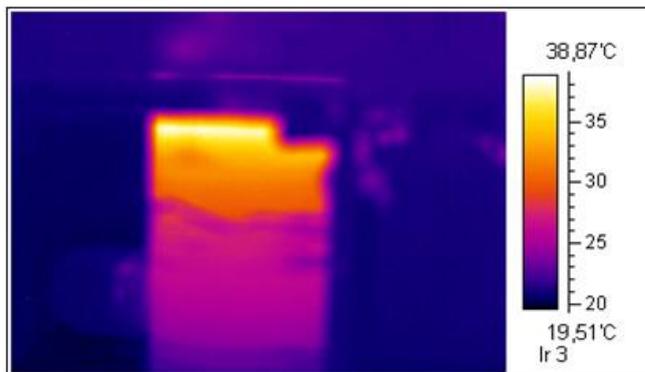
$$\theta_{t_{x=0}} = \frac{t - t_n \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right)} \quad (4.11)$$



А

Б

Рисунок 4.4 – Снимок, сделанный спустя 1 (а) и 2 (б) минуты



А

Б

Рисунок 4.5 – Снимок, сделанный спустя 3 (а) и 4 (б) минуты

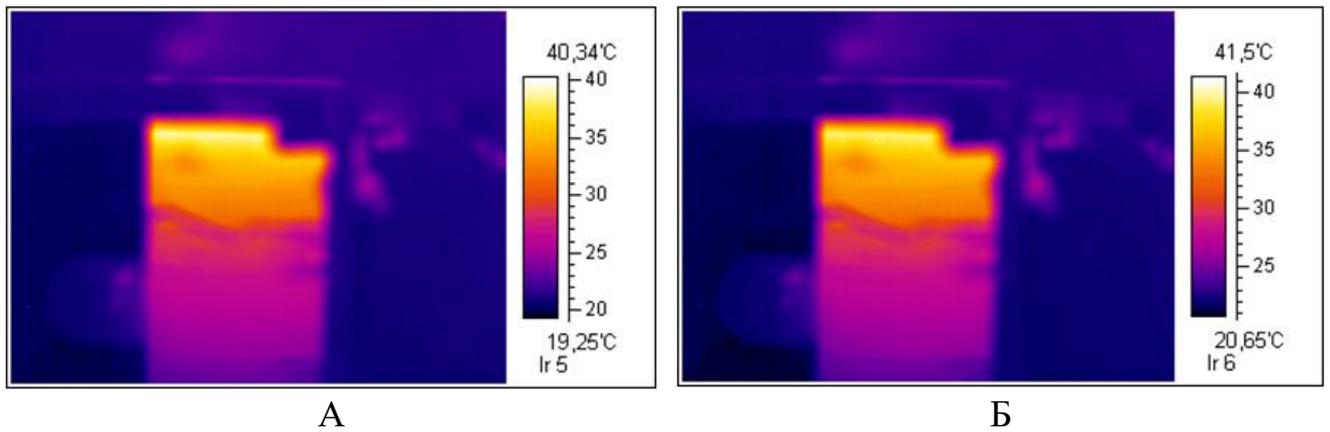


Рисунок 4.6 – Снимок, сделанный спустя 5 (а) и 6 (б) минут

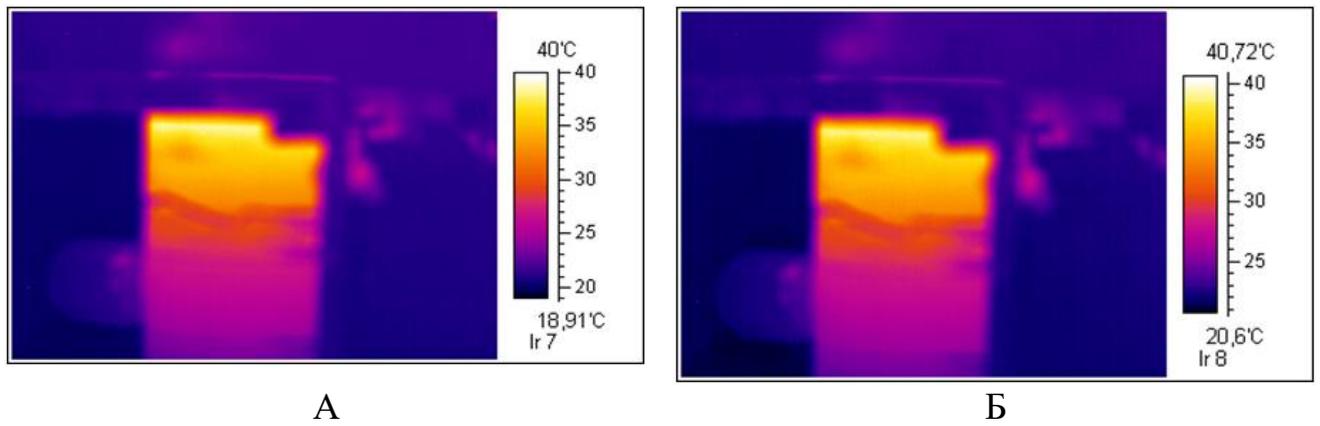


Рисунок 4.7 – Снимок, сделанный спустя 7 (а) и 8 (б) минут

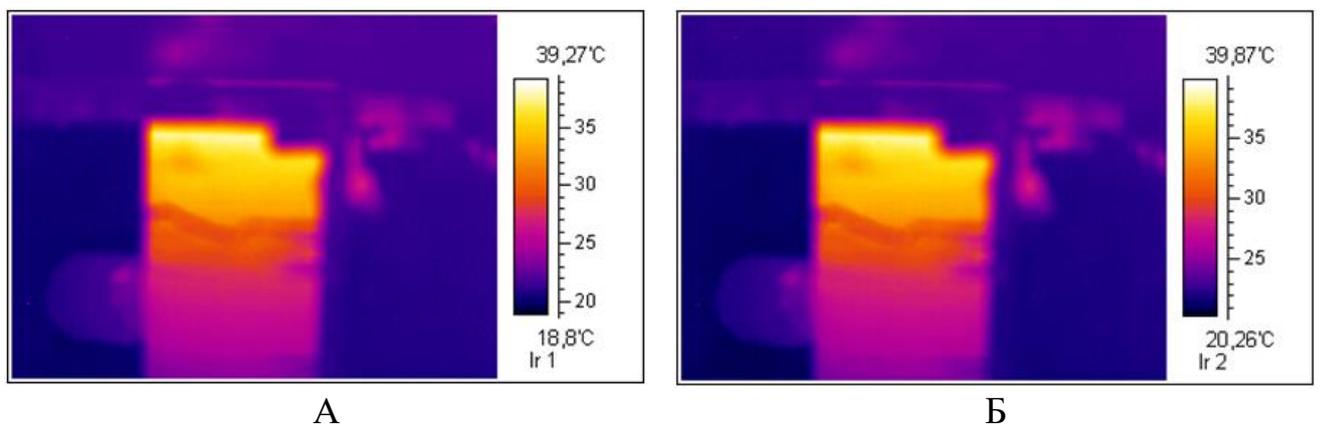


Рисунок 4.8 - Снимок, сделанный спустя 9 (а) и 10 (б) минут

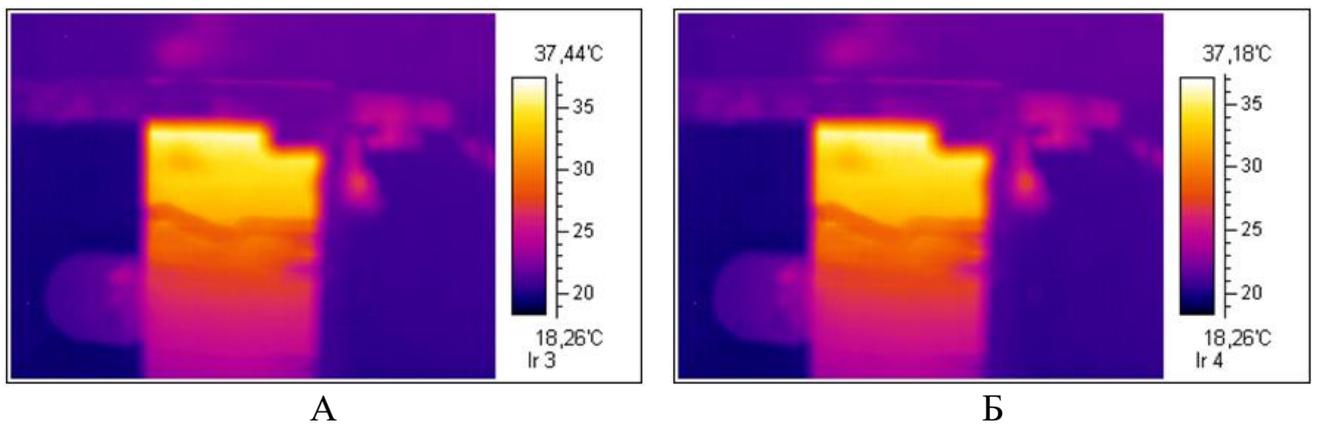


Рисунок 4.9 – Снимок, сделанный спустя 11 (а) и 12 (б) минут

Используя тепловизионные фотографии, определим изменение температуры t на внешней поверхности корпуса вискозиметра с течением времени (рисунок 4.12, таблица 4.5).

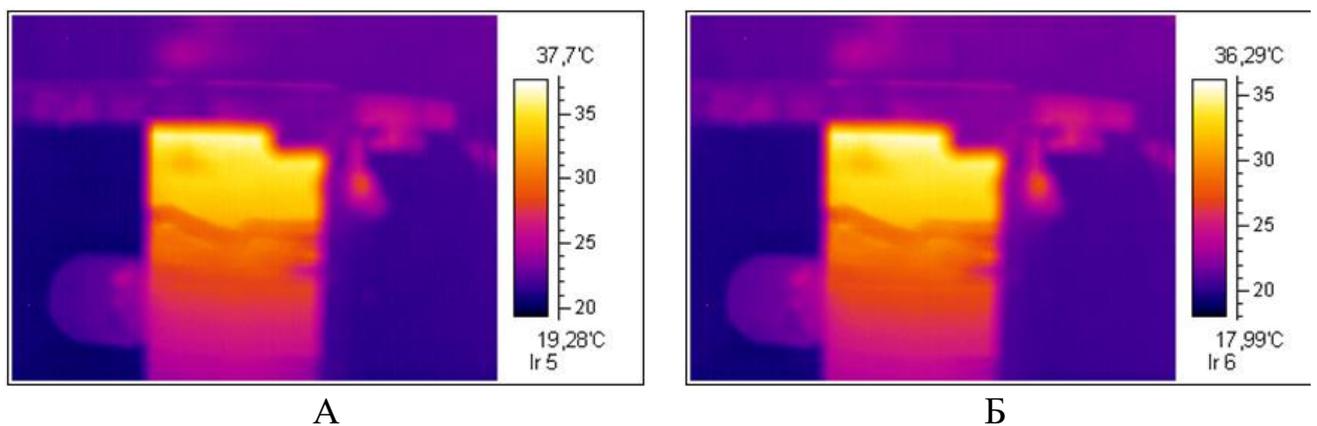


Рисунок 4.10 – Снимок, сделанный спустя 13 (а) и 14 (б) минут

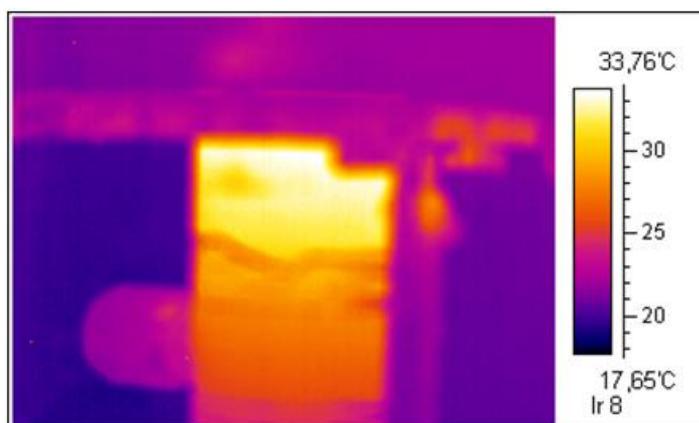


Рисунок 4.11 – Снимок, сделанный
спустя 15 минут

Таблица 4.4 – Результаты эксперимента

τ , мин	0	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00
$t_{x=0}$, °C	19,0	65,8	52,5	47,0	45,1	43,9	40,9	39,2
τ , мин	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
$t_{x=0}$, °C	36,8	36,4	36	35,6	35,2	34,8	34,5	34,2

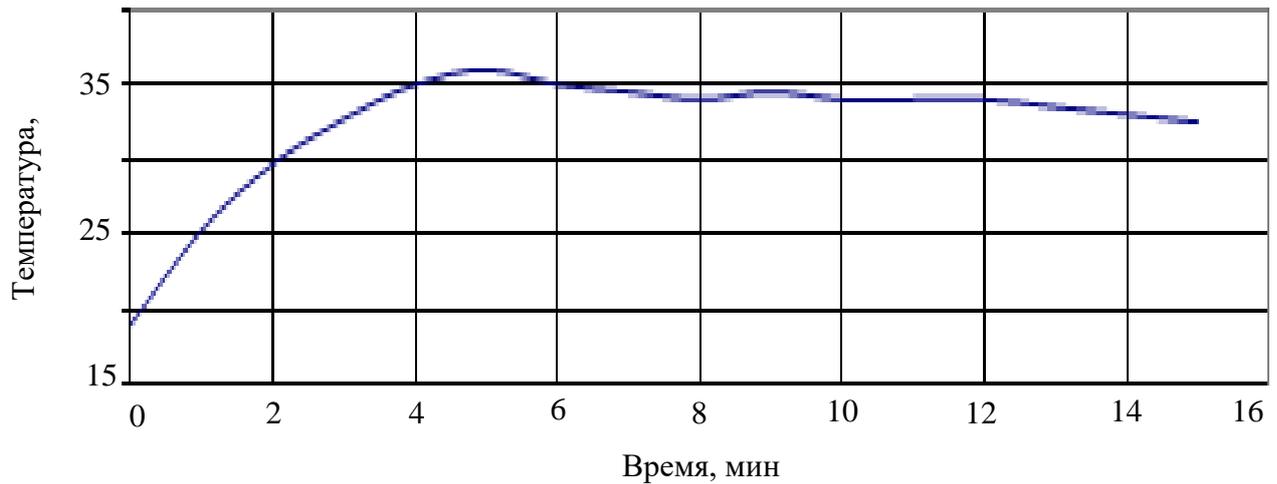


Рисунок 4.12 – Изменение температуры корпуса с течением времени

В этой формуле толщина корпуса в зоне измерения температур $x = 60$ мм. Для упрощения расчета и уменьшения вероятности совершения ошибки он проводился пошагово. По таблице 4.5 можно проследить все этапы расчета. За Y была обозначена функция $\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}$.

Таблица 4.5 – Расчет температур на границе контакта жидкости

τ , сек	t , °C	Y	$erf(Y)$	$t_{x=0}$, °C	τ , сек	t , °C	Y	$erf(Y)$	$t_{x=0}$, °C
0	19,0	0,000	0	19,00	480	34,0	0,375	0,404	44,17
60	25,3	1,062	0,867	66,32	540	34,5	0,354	0,383	44,14
120	29,7	0,751	0,712	56,13	600	34,0	0,336	0,365	42,63
180	32,7	0,613	0,614	54,49	660	34,0	0,320	0,349	42,05
240	35,0	0,531	0,547	54,34	720	34,0	0,307	0,336	41,58
300	36,0	0,475	0,498	52,88	780	33,5	0,295	0,323	40,43
360	35,0	0,434	0,461	48,66	840	33,0	0,284	0,312	39,35
420	34,5	0,401	0,429	46,16	900	32,5	0,274	0,302	38,33

Для наглядности строим график зависимости температуры жидкости на границе с внутренней поверхностью корпуса (рисунок 4.26, кривая 1).

Сопоставляя графики температур, определенных при помощи термопары непосредственно в зоне контакта жидкости с внутренней поверхностью, и температур, рассчитанных с использованием предложенной методики (рисунок 4.13-4.14), видим соответствие этих температур на временном участке от 0 до 100 с, следовательно, разработанный метод определения температур при помощи тепловизионного контроля имеет право на существование и применение.

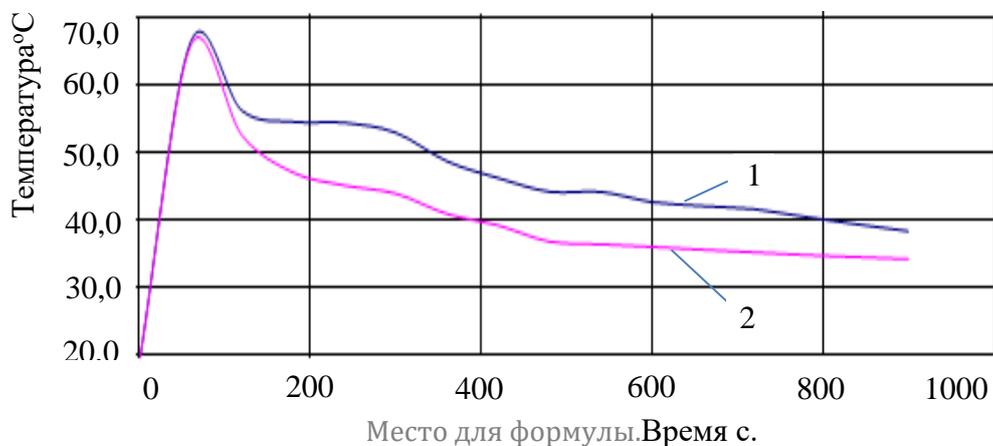


Рисунок 4.13 – Графики температур, определенных по термопаре и рассчитанных по разработанной методике

Установленная погрешность приведена на рисунке 4.14.

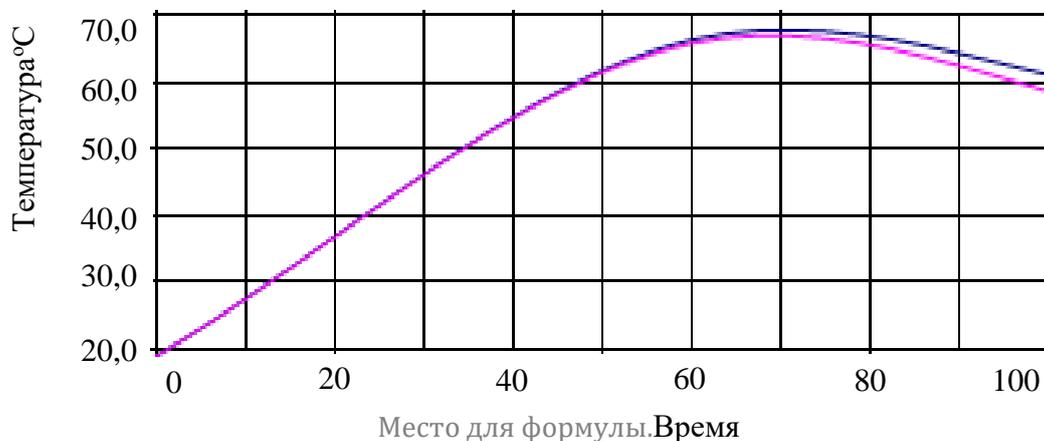


Рисунок 4.14 – Погрешность расчетных значений температур по отношению к начальной

Кроме того, моделировали процесс нагрева с использованием программного пакета SolidWorks (CosmosWorks) (рисунок 4.15). Результаты натурного и математического моделирования показывают достаточную точность предложенного метода определения температуры, позволяющего оценивать теплоту фазовых переходов и химических реакций, проходящих при высоких давлениях.

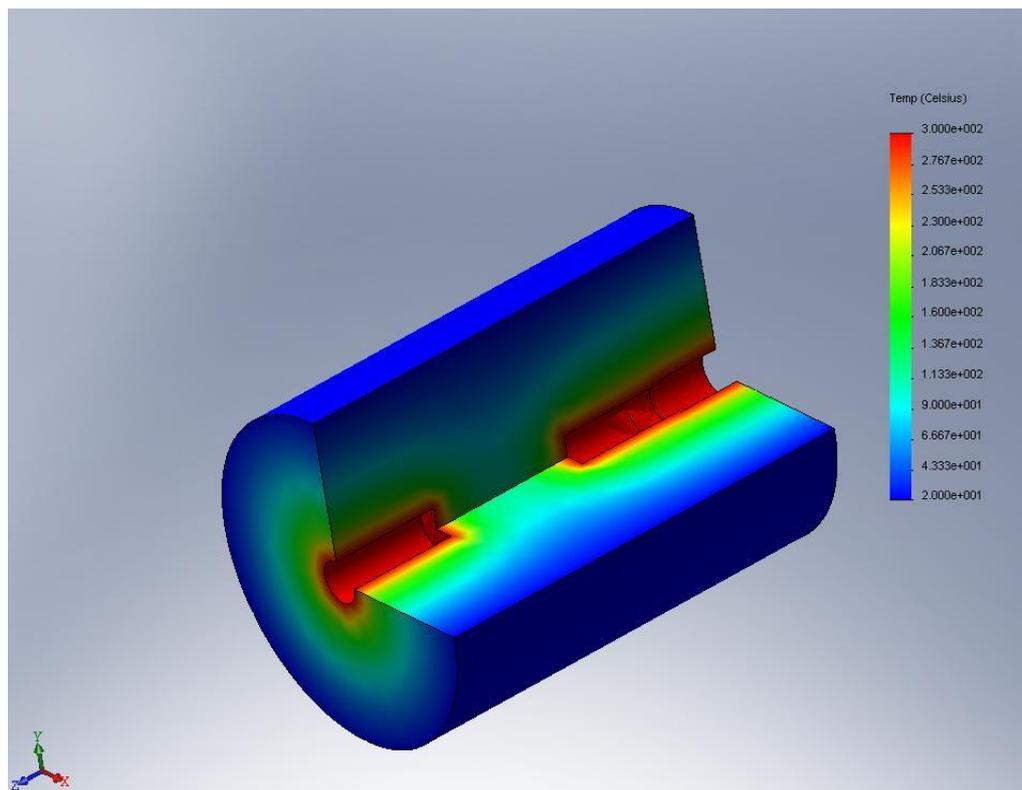


Рисунок 4.15 – Результат моделирования распределения температуры, выполненный с использованием программного пакета SolidWorks

4.2. Разработка системы виброакустического контроля

Акустический, один из самых старых и распространённых методов диагностики. Диапазон частот колебаний, слышимых человеком, – 16 Гц - 20 кГц. Значительное число дефектов оборудования порождают колебания в этом частотном диапазоне. В диапазоне инфразвука от 0 до 16 Гц происходит ряд процессов, исследуемых методами акустической эмиссии. В диапазоне

ультразвука, частота выше 20 кГц, фиксируются процессы пульсаций горения, дефекты механических систем. Следовательно, система контроля параметров должна покрывать весь исследуемый диапазон. Кроме того, учитывая, что система изначально предназначалась для первичной диагностики персоналом, не прошедшим специальной подготовки, предложенная конструкция и методика её применения была максимально упрощена. Для идентификации процессов применена система, использующая микрофоны с разными частотными диапазонами и разными резонансными частотами. Оператор, прослушивая механизм последовательно в двух диапазонах частот с одинаковым коэффициентом усиления, уверенно распознаёт кавитационные явления (см. рис 4.16), дефекты механических передач, внутренние утечки как газов, так и жидкостей. Кроме того, для облегчения локализации дефектов используется группа микрофонов, располагаемых в разных участках конструкции, последовательно подключаемых на общий усилительный каскад. В качестве системы контроля применён USB осциллограф BM8020. Осциллограф оснащён анализатором спектра, самописцем, логическим генератором, его основной особенностью является возможность передачи данных непосредственно в программу расчётного определения параметров.

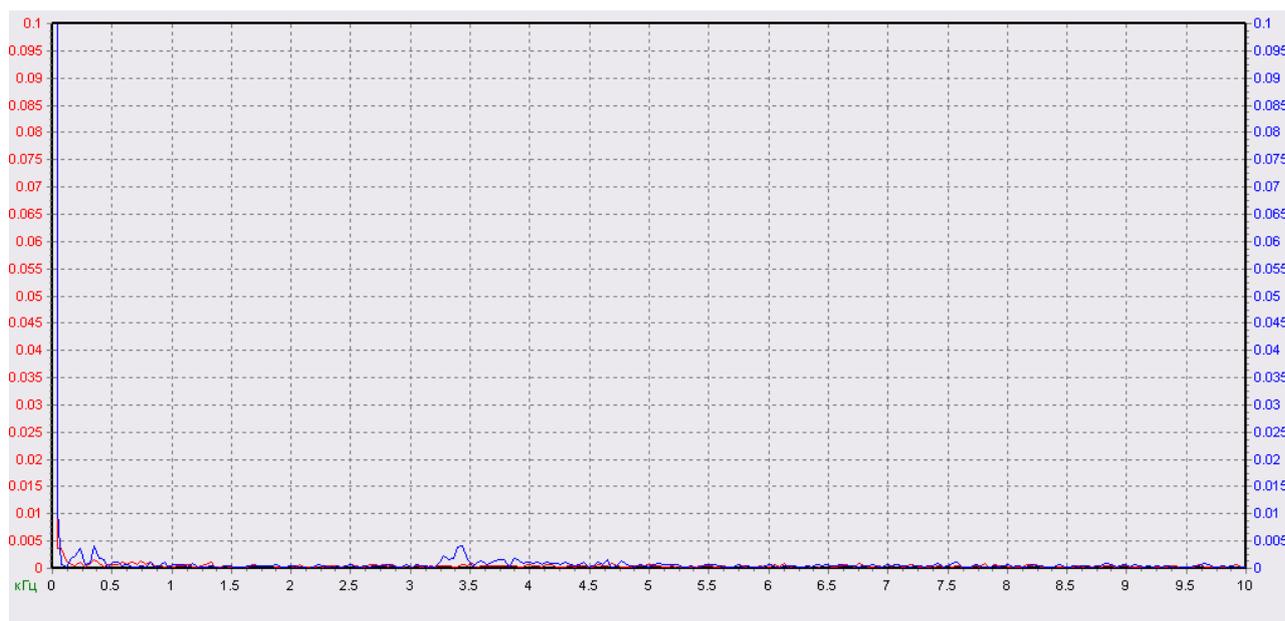


Рисунок 4.16 Виброакустическая характеристика регулятора расхода (кавитация наблюдается)

Подробные технические характеристики осциллографа VM8020

1. USB осциллограф, спектро-анализатор:

- количество каналов 2
- частота дискретизации 100 Гц ... 200 кГц
- глубина памяти чтение через буфер: 1126 отсчетов/канал (1 канал), 563 отс/кан (2 канала)

поток чтение: 64К отсчетов/канал (1 или 2 канала)

- входное напряжение -20 ... +20 В (аппаратно 2 поддиапазона)
- разрядность АЦП 10 бит
- синхронизация абсолютная (по нарастающему/спадающему фронту), дифференциальная (по разнице между соседними отсчетами), внешняя (по нарастающему/спадающему фронту ТТЛ уровни)
- оконные функции Хамминга, Ханнинга, Блэкмана, Блэкмана-Харриса

2. Самописец:

- частота дискретизации 0,01 Гц ... 200 кГц
- максимальное время записи 24 часа при $F_d < 100$ Гц
- входное напряжение -20 ... +20 В (аппаратно 2 поддиапазона)
- разрядность АЦП 10 бит

3. Логический анализатор*:

- количество каналов 16 (8 при включении логического генератора)
- частота дискретизации 1 КГц ... 8 МГц
- глубина памяти

чтение через буфер ($F_d=4-8$ МГц): 128 бит/канал

чтение через буфер ($F_d=2-2,66$ МГц): 1160 бит/канал

чтение через буфер ($F_d \leq 1$ МГц): 1544 бит/канал

чтение через буфер в режиме склейки 1 Мбит/канал

поток чтение ($F_d < 500$ кГц): от 4К до 256М бит/канал

- входное напряжение 0 ... +5 В (есть защита от перенапряжения)
- синхронизация по фронтам, маске, пропуск импульсов, внешнее тактирование
- тактирование внутренне / внешнее

4. Логический генератор*:

- количество каналов 8
- частота дискретизации 1 кГц ... 1 МГц
- глубина памяти 1544 бит/канал
- выходное напряжение "0" - 0 В, "1" - 3,3 В
- максимальный втекающий/вытекающий ток 10 мА

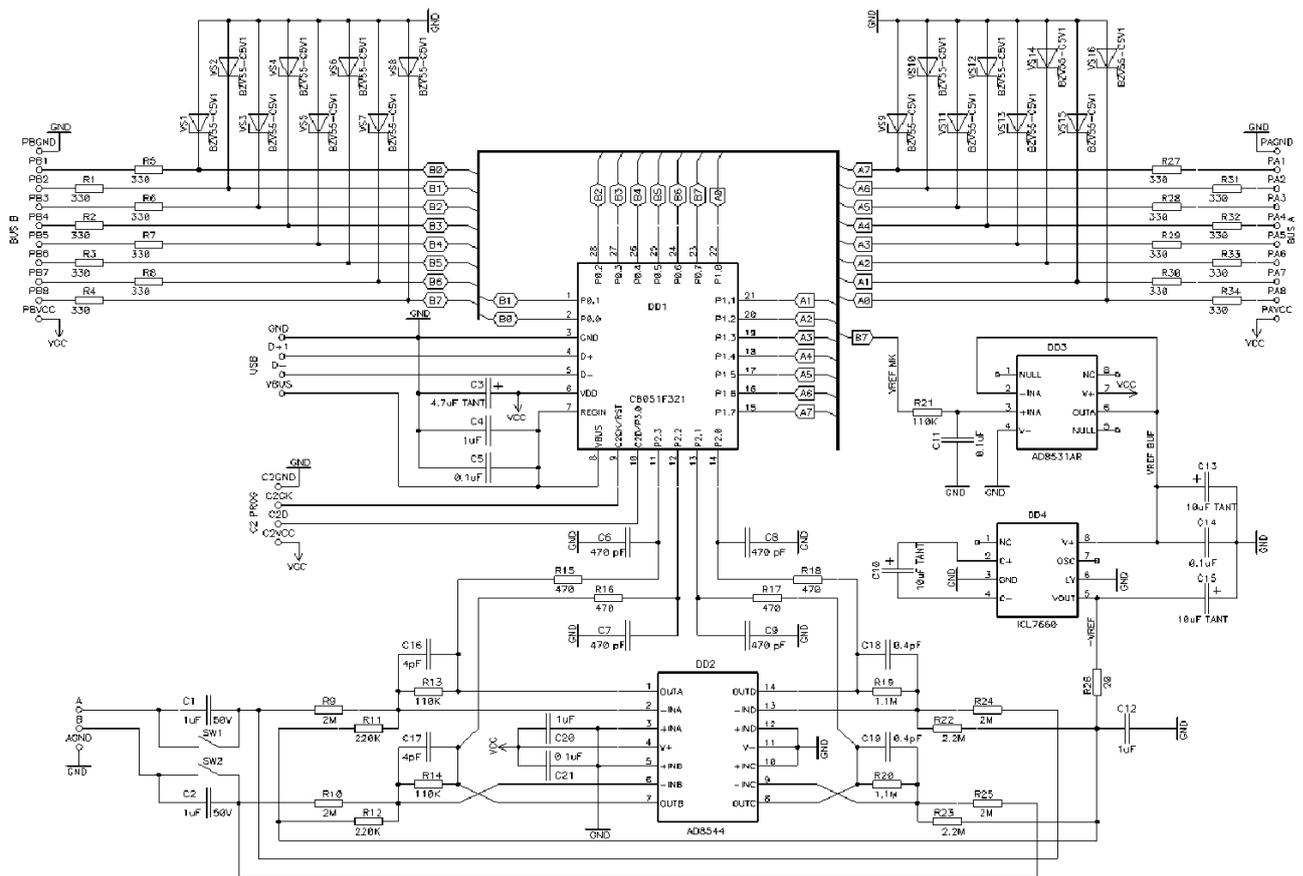


Рисунок 4.17 Принципиальная схема осциллографа VM8020

За основу системы усиления и преобразования сигнала применена микросхема к 157УД2, а в качестве усилителя в акустическом диапазоне применена малошумящая микросхема TDA 2822M, в качестве чувствительных микрофонов использованы MA40S4R и микрофон KPCM-MSA3722H11-42DB.

При использовании микрофона, работающего в ультразвуковом диапазоне (MA40S4R). контур L1 C1 (см. рис 4.18) настраивается на резонансную частоту микрофона 40 кГц.

Для работы в акустическом диапазоне применён микрофон KPCM-MSA3722H11-42DB, в этом варианте контур L1 C1 настраивается на резонансную частоту микрофона 1 кГц. Таким образом, была достигнута многодиапазонность работы прибора. Настройка на конкретные значения частотных полос позволяет легко идентифицировать виды неисправностей, соответствующие определённым частотным диапазонам.

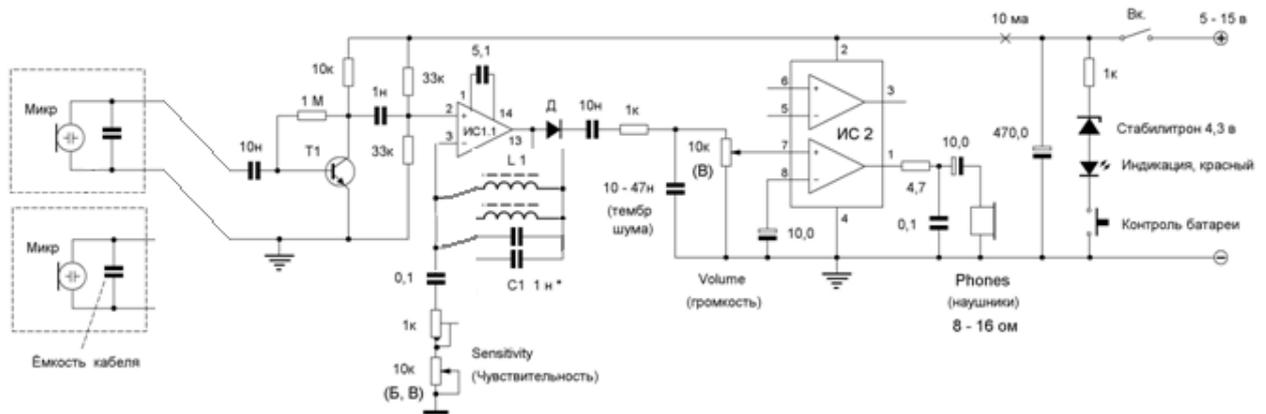


Рисунок 4.18 Схема усилителя преобразователя

Для снятия вибрационного сигнала использовали промышленный ADXL335 (GY-61) – 3-х осевой аналоговый акселерометр.



Рисунок 4.19 Внешний вид датчика вибрации

Акселерометр определяет вектор ускорения в трёхмерной плоскости, поскольку имеет три оси, нанесённые на корпус датчика. Максимально измеряемое ускорение составит 3,6g, но датчик может выдерживать перегрузки в 10000g. Акселерометр ADXL335 работает от напряжения 3.3 В. Частотный диапазон от 0.5 Гц до 60 кГц.

4.3 Модернизация системы контроля давления

Существует большое количество типов и конструкций манометров, имеющих как достоинства, так и недостатки. Неудобства применения абсолютных и относительных жидкостных манометров, связанные либо с необходимостью

изменения конструкции исходной установки, либо со сложностью их калибровки, привели к необходимости использования электрических манометров.

В качестве прибора для определения величины давления в исследуемой области был выбран манганиновый манометр, так как только манганин обладает линейной зависимостью электрического сопротивления от давления, что, несомненно, упрощает процедуру градуирования системы замера давления, после которой им можно будет снимать показания с манометра. Кроме того, данный тип измерителей давления обладает максимальным быстродействием, что позволяет его использовать для оценки быстро протекающих процессов.

Эксперименты показывают, что линейная зависимость сохраняется с точностью 99,3% при давлении до 1000МПа. Точность измерения зависит от точности измерения электрического сопротивления проволоки, а также от качества самого манганина.

Для повышения точности измерения сопротивления необходимо термостатировать катушку манометра, поскольку коэффициент изменения сопротивления манганина зависит не только от давления, но и от температуры (рисунок 4.20) [234].

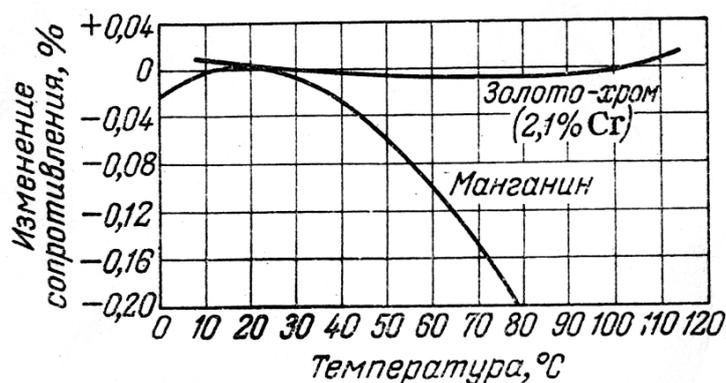


Рисунок 4.20 – Зависимость сопротивления манганина от температуры

Конструкции манганиновых манометров [67] отличаются, главным образом, способом электроввода и методом изготовления катушки. Для герметизации был использован шеллак [235]. На рисунке 4.21 изображена одна из конструкций манганиновых манометров. Особый интерес вызывает способ передачи давления

на катушку. При условии, что происходит измерение давления неэлектропроводной жидкостью, то применяется метод прямой передачи давления. Данный метод ограничивается давлением 10000 атм. Это связано с тем, что из-за большого увеличения вязкости жидкости на катушке возникают напряжения сдвига, которые искажают показания манометра.

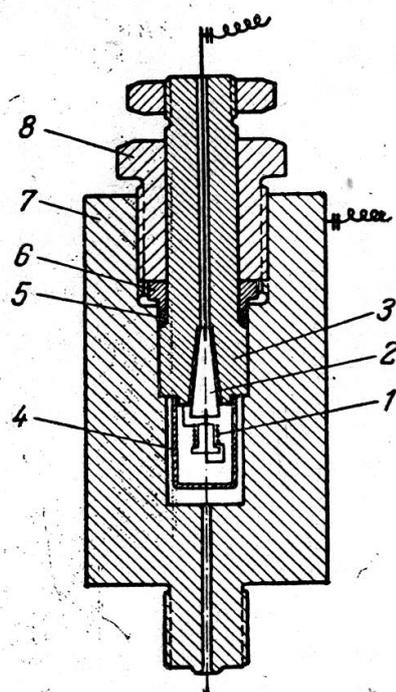


Рисунок 4.21 – Манганиновый манометр [67]: 1 – катушка; 2 – изолированный конус; 3 – головка; 4 – колпачок; 5 – прокладка; 6 – грундбукса; 7 – корпус; 8 – гайка

Определенную проблему представляла и необходимость усиления сигнала, получаемого от применяемого типа манометров, высокий коэффициент усиления до 10000 раз требовал специализированной аппаратуры для уменьшения влияния помех. В зависимости от необходимой точности используются разнообразные схемы для измерения сопротивления катушки.

1. Схема равновесного моста позволяет проводить измерение сопротивления катушки с точностью до 0,01 Ом. Мост питается в 6 В, как правило, от аккумулятора, напряжение с которого должно быть стабилизировано с большой точностью.

Чувствительность такой схемы пропорциональна напряжению источника питания. Ограничением служит тот факт, что при наличии слишком сильного тока произойдет перегрев проволоки, а следовательно, и искажение результатов измерения.

2. Схема неравновесного моста является более простой и удобной, но обладает пониженной точностью измерений. При отсутствии давления мост создается таким образом, чтобы показания гальванометра равнялись нулю. В момент приложения нагрузки на мост стрелка гальванометра начнет отклоняться.

Для повышения точности измерений давления необходимо определять сопротивление катушки с точностью не менее 0,001 Ом. [236].

О. Г. Кацнельсон и И. А. Ихлов разработали схему (рисунок 4.22), принцип работы которой заключается в том, что измерения проводят только при одновременном изменении и сопротивления, и давления. Эта схема была применена.

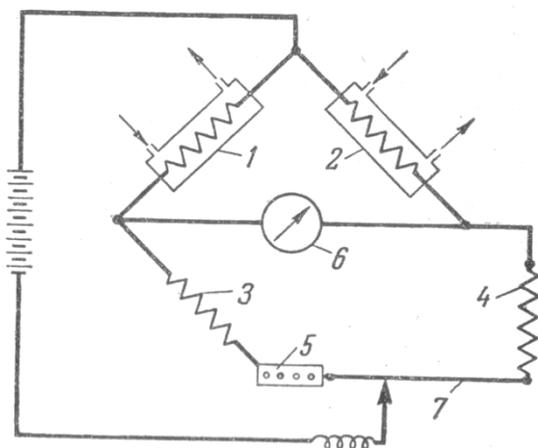


Рисунок 4.22 – Схема Кацнельсона и Ихлова:

1 – катушка под измеряемым давлением; 2 – катушка при атмосферном давлении; 3, 4 – катушки моста; 5 – магазин сопротивлений; 6 – регистратор; 7 – реохорд

Термостатированные катушки 1 и 2, имеющие одинаковое сопротивление с точностью 0,2-0,3 Ом, являются плечами равновесного моста. Катушка 1 находится под давлением, в отличие от катушки 2. Катушки 3 и 4, входящие в мост, имеют одинаковое сопротивление с катушками 1 и 2. Применяемая схема позволила определять величину рабочего давления в системе с точностью до 0.01 МПа при уровне давлений от 0.1 до 500 МПа.

4.4 Практическое применение разработанной системы автоматической регистрации параметров экспериментального оборудования

Одной из задач, решенных при создании установки, явилась обработка дифференциальных (разностных) сигналов, полученных с датчиков давления. Попытка применить операционные усилители (ОУ), включенные по схеме вычитания сигналов, необходимой точности замеров не обеспечила, поскольку высокий уровень синфазных помех не позволял выделить с высокой точностью полезный сигнал. Источниками таких синфазных помех могли служить самые различные внешние устройства и сети, в том числе бытовое и промышленное электрооборудование, сеть электропитания промышленной частоты и прочие. Характерная особенность синфазных помех заключается в том, что они наводятся одновременно на оба входа дифференциальной схемы и на каждом из входов имеют одинаковую величину напряжения относительно общей шины источников питания.

Идеальный усилитель, выполняющий функцию вычитания, практически полностью устраняет влияние синфазной помехи, в то время как реальный не обладает таким свойством. Для оценки способности схемы усиления противостоять воздействию синфазных напряжений используется параметр, называемый коэффициентом ослабления синфазных сигналов, который у идеального усилителя с функцией вычитания имеет бесконечно большую величину, а у реальных – конечное значение.

Например, для типовой схемы включения операционного усилителя, обладающей чувствительностью к идентичности номиналов резисторов при единичном коэффициенте усиления (сопротивления всех резисторов одинаковы), отклонение номинала любого из резисторов на 0,1% от выбранного значения может снизить значение коэффициента ослабления синфазных сигналов до 66 db.

Таким образом, предъявляемые высокие требования к точности и повторяемости характеристик используемой элементной базы приводят к удорожанию изделия за счет необходимости в подстройке номиналов элементов при эксплуатации. Недостатком усилителя на основе схемы вычитания напряжений является относительно малое входное сопротивление, в основном определяемое величинами сопротивлений используемых резисторов.

Подключение высокоомных источников напряжения приведет к потерям его мощности ввиду шунтирования сигнала. Входное сопротивление усилителя можно повысить за счет увеличения сопротивлений резисторов, но это будет способствовать увеличению уровня шумов из-за возрастания теплового шума и ограничению полосы пропускания [237]. Устранить данный недостаток удалось при использовании инструментального усилителя (перевод с английского “instrumentation amplifier” означает “измерительный усилитель”) [237]. Значительный вклад в общую ошибку измерений вносят высокочастотные помехи на входах инструментального усилителя, действующие в диапазоне частот, превышающем верхнюю границу полосы пропускания. Инструментальные усилители характерны тем, что величина их коэффициентов ослабления синфазных сигналов резко уменьшается за пределами полосы пропускания. Это способствует попаданию во внутренние цепи помех радиочастотных диапазонов и их выпрямлению на внутрисхемных нелинейных элементах, приводящему к дрейфу выходного напряжения.

Был реализован вариант включения инструментального усилителя по мостовой схеме (рисунок 4.23).

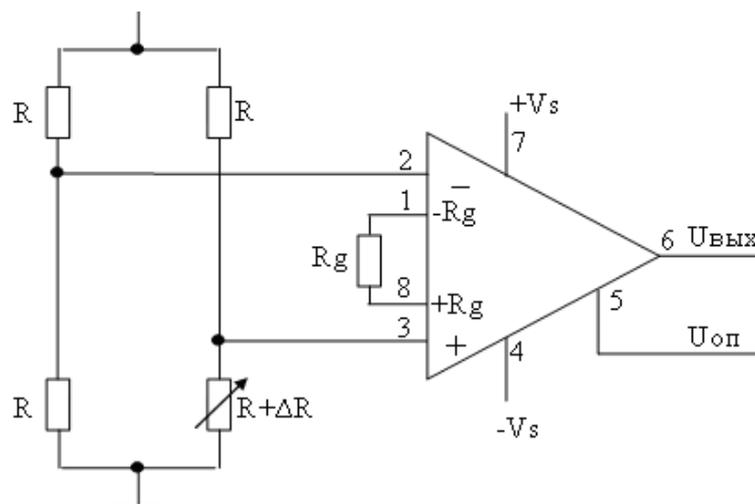


Рисунок 4.23 – Мостовая схема включения инструментального усилителя

Измерительный мост питается от источника с напряжением U_m .
Напряжение $U_{вых}$ на выходе инструментального усилителя

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{м}}}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] K_u, \quad (4.1)$$

где ΔR – отклонение от своего номинального значения величины сопротивления датчика при внешнем воздействии, K_u – коэффициент усиления инструментального усилителя, задаваемый резистором R_g ;

Был использован двухполярный источник питания.

Схема обладает высоким значением коэффициента ослабления синфазных сигналов, работоспособна в широком диапазоне сопротивлений резисторов R за счет высокого входного импеданса, что позволяет ее применять в устройствах измерения температуры, давления и многих других, которые допускают мостовое включение датчиков [238, 239].

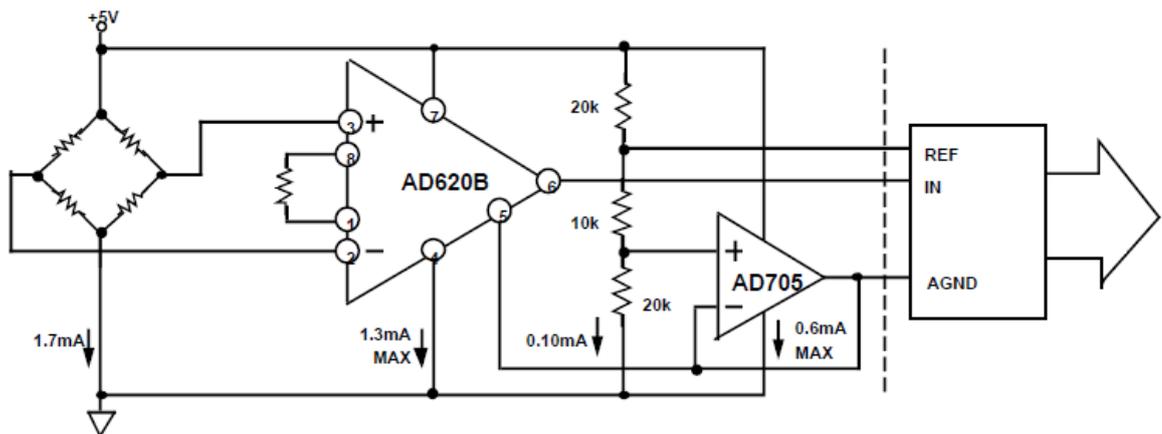


Рисунок 4.24 – Примененная схема усилителя

Для автоматизации фиксации экспериментальных данных использовали два независимых подхода. Сигнал с датчиков давления, температуры и положения усиливали на инструментальном усилителе AD620B, подавали на аналого-цифровой преобразователь серии ЛА-50 и обрабатывали по стандартной процедуре. Одновременно был реализован и второй вариант: сигнал с датчиков давления и положения выводили на цифровые вольтметры при одновременном использовании тепловизионного оборудования и образцовых манометров, весь

комплекс сигналов фиксировали видеокамерой и обрабатывали системой технического зрения в пакете National Instruments LabVIEW 2010 [240, 241].

4.5 Созданные системы диагностики гидравлических характеристик рабочих сред высоконагруженных узлов металлургических машин

Наиболее информативным и важным свойством с точки зрения эксплуатации высоконагруженных узлов является вязкость рабочей среды. Наибольший интерес с точки зрения диагностики представляет вязкость в условиях нагружения максимальным для каждой системы давлением. В то же время характер отказов пресса для испытаний труб цеха 4 ОАО «ПНТЗ» г. Первоуральск с рабочим давлением 200 МПа указывает, что отсутствия изменения вязкости в больших объёмах и очистка жидкости до 8-го класса чистоты по стандарту NAS ещё не гарантирует безаварийной работы системы. Данный отказ был вызван облитерацией зазоров присадкой армированной окалиной, отделявшейся от внутренней поверхности трубы при испытаниях. Необходимо отметить, что средний размер частиц окалины лежал в диапазоне от 0.3 до 1 мк и примерно в 20 раз меньше блокируемых зазоров, что по существующим нормативам считается неопасным. Необходимо определять параметры рабочей среды не только в «больших» объёмах, но и в зазорах предельных для рассматриваемых систем. Так как при определении реологических характеристик жидких сред вискозиметры занимают особое место, то при описании экспериментальной установки необходимо рассмотреть вопрос современного состояния методов определения вязкости и применяемого исследовательского оборудования.

Определение характеристик углеводородов при давлениях более 150 МПа, а также в области фазовых переходов, где могут наблюдаться как процессы стеклования, так и кристаллизации, затруднено появлением зон, сильно отличающихся по вязкости. Кроме того, при давлениях выше 200 МПа при проектировании вискозиметров необходимо принимать во внимание изменение с ростом давления свойств конструкционных материалов, параметров измерительных устройств, химической активности среды и других факторов.

Анализ конструкций установок, используемых для определения характеристик рабочих сред при давлениях свыше 150 МПа показывает, что преобладают модификации вискозиметра Стокса, оснащенные системой фиксации времени перемещения тела под действием силы тяжести внутри контейнера, где и создается требуемое давление. Подобный подход, по мнению автора, не совсем корректен, так как возможность полного учета начальных сдвиговых напряжений проблематична. Применение вискозиметров, использующих действие затухающих колебаний при исследовании вязкости углеводородов при высоких давлениях, ограничено эффектами, связанными с изменением механических свойств материалов упругого подвеса при давлениях свыше 200 МПа. Капиллярные и ротационные вискозиметры позволяют определять вязкость углеводородов при высоких давлениях с достаточной точностью. Для исследования вязкости углеводородов в условиях высокого и сверхвысокого давлений создана серия вискозиметров. Были разработаны конструкции капиллярного и ротационного вискозиметров. Капиллярные вискозиметры превосходят ротационные в точности замеров при исследовании ньютоновских жидкостей, но сильно им уступают при определении характеристик вязкоупругих систем. Это связано с тем, что при течении неньютоновских сред наблюдается отличие от параболической зависимости скорости сдвига с изменением расстояния от стенки до оси канала, следовательно, точно определить скорости сдвига по всему сечению капилляра весьма затруднительно. Между тем капиллярный вискозиметр весьма эффективен для определения вязкости углеводородов в области ламинарных течений.

4.5.1 Разработка конструкции капиллярного вискозиметра для определения вязкости рабочих сред в диапазоне от 10 до 1000 сСт при давлениях до 200 МПа

В связи с тем, что планируемое исследование было решено проводить при давлениях до 5000 атм, а насос высокого давления серии НГР-2000, которым мы располагали, предназначен только до 2500 атм, стало необходимым применение еще одного устройства повышения давления. Этим устройством был выбран

мультипликатор. Наиболее важная часть установки – устройство для измерения вязкости жидкости, в качестве которого был выбран капиллярный вискозиметр (рисунок 4.25), достаточно эффективный для определения вязкости при давлениях свыше 1000 атм, а простота его внутренних каналов позволит упростить разрабатываемую теорию для описания поведения жидкости.

Для повышения точности эксперимента в капиллярном вискозиметре необходимо обеспечить разделение зон исследуемой жидкости и рабочей жидкости привода и также желательно обеспечить минимальный внутренний объем исследуемой жидкости. Согласно теории, размер капилляра и расход должны обеспечивать ламинарный режим движения жидкости.

Созданный вискозиметр оснащен капилляром диаметром 0,5 мм, длиной 95 мм, выполненным из твердого сплава, что обеспечивает наличие успокоительного участка и уменьшает влияние эрозионного износа [246]. Следовательно, выполняются все требования.

Давление замеряют на границах капилляра. Движение жидкости обеспечивается перемещением системы плунжеров, входящих в состав мультипликатора давлений. Отдельный контур предназначен для заполнения исследуемой жидкостью и создания предварительного давления в полости вискозиметра. Расход жидкости регистрируют путем отслеживания положения плунжеров. Торможение потока осуществляется при помощи дросселя. Прохождение жидкости через рабочую полость однократное. Отдельно рассматривается вопрос фиксации температуры исследуемой жидкости. При работе на давлениях свыше 10^8 Па применяли лишь самоуплотняющиеся уплотнения. Причем контур высокого давления имеет фторопластовые самоуплотняющиеся уплотнения, аналогичные примененным Циклисом [67]. Значительную проблему при исследовании вязкости представляют продукты износа пар трения и продукты химических реакций, проходящих при высоких давлениях. Существенным ограничением является невозможность осуществления удаления продуктов окисления методом травления с последующим

пассивированием, так как эти мероприятия приводят к разрушению манганиновых датчиков давления.

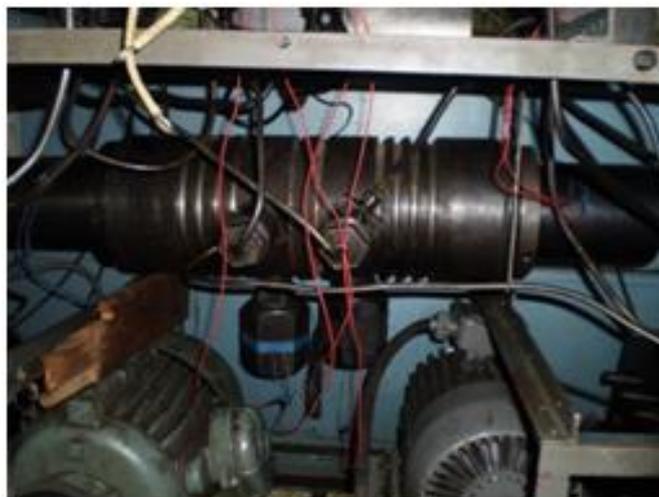


Рисунок 4.25 – Внешний вид капиллярного вискозиметра

Известно, что точность определения вязкости при использовании капиллярного вискозиметра зависит от точности определения перепада давления на капилляре. Для замера давления применены манганиновые манометры, имеющие рабочий диапазон от 200 до 1000 МПа, но на электрическое сопротивление используемого в датчиках материала влияет как изменение давления, так и изменение температуры [247]. Изменения температуры показали пробные прогоны. Следовательно, точность определения вязкости ставилась под сомнение. Кроме того, представляла интерес температура жидкости и ее время стабилизации.

Классический подход предусматривает подъем давления до заданной величины и организацию движения в капилляре, только после стабилизации температуры. Нельзя было исключить повторное повышение температуры при создании перепада давлений на капилляре. Поскольку отсутствие надежной системы контроля температуры ставило под сомнение достоверность получаемых результатов, наибольшее внимание было уделено этому вопросу. Использование термопар затруднено тем, что высокое давление вызывает изменение термоэлектрической движущей силы термопары [67], что существенно влияет на

ее показания. Даже если пользоваться предложенной П.У. Бриджманом, Ф. Бонди и К. Свенсоном поправкой, точность исследований окажется очень низкой.

Было принято решение проводить расчет температуры исследуемой жидкости в камере высокого давления, опираясь на результаты замеров температурных полей наружной поверхности аппарата. Методика подробно изложена ранее в разделе определения температуры. Кроме того, недостаток этой системы измерения вязкости вблизи точек фазовых переходов – неравномерность поля давления при движении жидкости в капилляре.

Последовательность замеров.

Систему промывали исследуемой жидкостью, проходящей через фильтры грубой и тонкой очистки (3 мк полнопоточный), контроль осуществляли прибором CCS 4 Contamination Control фирмы Internormen.

После достижения требуемой чистоты (добивались 8-го класса по системе NAS) плунжеры разводились в крайние положения, после чего одна поршневая система выдвигалась полностью. Система сброса перекрывалась, и давление плавно увеличивалось до расчетного. Скорость подъема давления: 10 МПа в минуту. Время выдержки под давлением – не менее 20 минут до начала измерений. Регулируя подводом и отводом давления в поршневой полости мультипликатора задвинутого поршня, поддерживая давление в поршневой полости противоположного мультипликатора, добивались разности давлений и движения поршневой системы. Перемещение оценивали с помощью резистивного датчика положения, скорость перемещения варьировали в соответствии с планом эксперимента от 0.1 до 3 мм/с. Перемещение поршневой системы и перепад давлений на капилляре фиксировали с частотой обновления 5 мс, что, как показал опыт, было избыточным. Оценивали точность измерений контрольными прогонами тестовой жидкости ПМС10 ГОСТ 13032-77, кроме этого, калибровали и по воде. Погрешность определяли оценкой разброса вязкости на откалиброванной системе при многократных прогонах. Погрешность не превышала 3% для диапазона замеров по давлению от 1 до 60 МПа (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Выборка из результатов тестовых прогонов

ΔP , Па	u м/с	Re	$Q_{орыт}$	$Q_{расчет}$	ε , %
			$10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$		
6100	1.2	1143	2.29	2.356	2,8
7000	1.55	1476	2.8	3.043	7,98

4.5.2 Разработка новой конструкции ротационного вискозиметра для определения вязкостных характеристик углеводородов при давлениях до 200МПа

Ротационный вискозиметр – прибор, основанный на измерении крутящего момента, передаваемого испытуемой жидкостью чувствительному элементу и являющегося функцией ее вязкости. Ротационный метод заключается в помещении жидкости в малый зазор между двумя телами для сдвига исследуемой среды [248]. Условно конструкцию ротационного вискозиметра можно разделить на несколько модулей: источник давления до 1500 атм; мультипликатор давления, позволяющий увеличить давление до 6000 атм; модуль измерения высокого давления; модуль стабилизации температурного режима; модуль измерения вязкости.

Для проведения исследования вязкостных характеристик жидкостей использовали ротационный вискозиметр с измерительной ячейкой типа коаксиальных цилиндров [249]. Подвижным является внутренний цилиндр, т. е. используется измерительная система Серле. Измерительная ячейка (рисунок 4.26) ротационного вискозиметра, помещенная в камеру мультипликатора высокого давления с максимально создаваемым избыточным давлением до 500 МПа, содержит цилиндрическую камеру, заполняемую анализируемой жидкостью, в которую погружен подвижный воспринимающий элемент (ротор) в виде тела вращения, приводимый во вращение вентильным электродвигателем с системой контроля потребляемой мощности и угла поворота, а также независимую индуктивную систему контроля угла поворота.

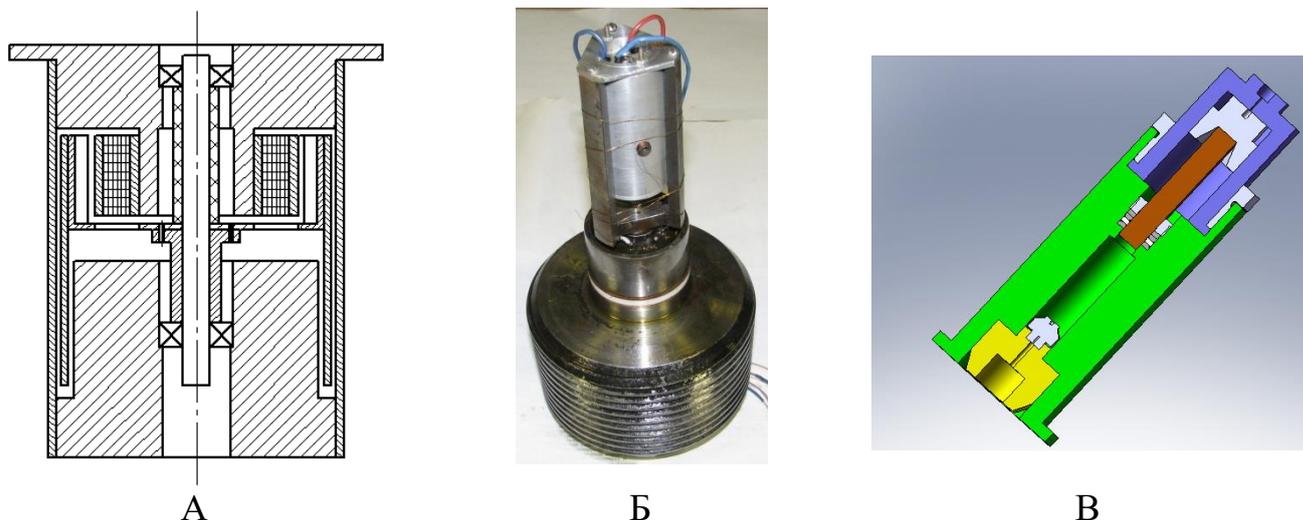


Рисунок 4.26 – Конструкция (а) и внешний вид измерительной ячейки (б) и блок повышения давления (в)

Постоянные магниты вентильного электродвигателя интегрированы во вращающийся ротор, внутри которого установлен цилиндрический вытеснитель таким образом, чтобы обеспечивать одинаковую скорость сдвига в наружном и внутреннем зазорах измерительного ротора. В качестве измерительного ротора использован полый цилиндр из неферромагнитного проводящего материала с интегрированными постоянными магнитами вентильного электродвигателя. Весьма эффективным оказалось использование контроля угла поворота измерительного ротора как независимой индуктивной системы, так и системы, интегрированной в вентильный электродвигатель, позволяющий менять частоту вращения измерительного ротора в широких пределах. В данном вискозиметре оператором задается частота вращения ротора и связанная с ней скорость сдвига. Другими словами, он является CR-реометром. Для привода вискозиметра использован бесколлекторный электродвигатель с питанием от постоянного тока, позволяющий плавно изменять частоту вращения от 0 до 7000 об/мин. Двигатель управляется электронным регулятором скорости, обеспечивающим изменение частоты вращения посредством широтно-импульсной модуляции фазового напряжения и синхронизацию подаваемого напряжения с вращением двигателя без применения дополнительных датчиков. Вязкость исследуемой жидкости вычисляется исходя из потребляемой приводным двигателем мощности. При

проведении измерений блок коаксиальных цилиндров помещается в герметичную емкость с исследуемой жидкостью, в которой с помощью мультипликатора создается избыточное давление до 500 МПа. Используемый ротационный вискозиметр обладает следующими характеристиками:

Вязкость исследуемых жидкостей	0,005-0,10 Па·С;
Скорость сдвига	5000-30000 с ⁻¹ ;
Давление исследуемой жидкости	0,1-500 МПа;
Температура исследуемых жидкостей	15-25°С;
Исследуемые жидкости, не токопроводящие углеводороды.	
Точность измерения напряжения источника питания	±0,1%;
Потребляемый ток	±0,8%;
Обороты ротора	±0,1%.

Для замера давления в разработанных вискозиметрах применены манганиновые манометры, имеющие рабочий диапазон от 20 до 1000 МПа.

Методика проведения замеров

Предварительно протравленную и пассивированную полость высокого давления промывали бензолом, аналогично промывали (без протравливания) подвижные элементы вискозиметра. Полость камеры высокого давления заполняли исследуемой жидкостью и затем устанавливали измерительный блок, своим разъемом герметизирующий зоны высоких давлений. После герметизации осуществляли контрольные прогоны с целью проверки оборудования и определения вязкости при атмосферном давлении. В зависимости от плана эксперимента плавно повышали давление в системе до расчетных величин. Скорость повышения давления 1 МПа в минуту. После фиксации давления в течение 20 минут производили раскрутку ротора и определяли вязкость среды. При этом фиксировали изменение объема жидкости путем отслеживания перемещения плунжера мультипликатора резистивным датчиком положения. Скорости сдвига измеряли от минимальных до максимальных. С целью уменьшения нагрева жидкости трением выдержка при фиксированной скорости

вращения – от 10 до 60 секунд в зависимости от плана эксперимента. При проведении ряда серий замеров давления повышали при функционирующем измерительном блоке. Изменения температуры контролировали путем фиксации внешних температурных полей, вязкость пересчитывали с учетом коррекции температуры. Эффект нагрева исследуемой жидкости сильно искажает результат измерений. Поэтому для коррекции результатов измерений был применен алгоритмический метод постобработки (рисунок 4.27).

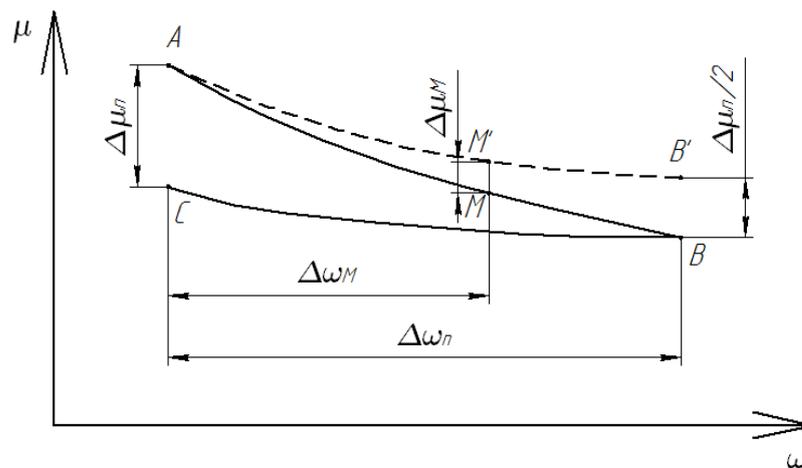


Рисунок 4.27 – Иллюстрация метода обработки результатов опытов для устранения влияния нагрева исследуемой жидкости

При построении кривой вязкости скорость сдвига и линейно с ней связанная угловая скорость ротора ω сначала равномерно повышается (кривая АВ на рисунке 4.27), а после достижения максимального заданного значения также равномерно снижается до первоначального значения (кривая ВС). Из-за нагрева исследуемой жидкости точки А и С не совпадают, возникает разность вязкости, обозначенная $\Delta\mu_{п}$. Требуется построить кривую АВ', являющуюся кривой вязкости жидкости неизменной температуры. Так как приводная мощность изменяется равномерно, с достаточной точностью можно считать, что разность между точками В и В' составляет $\Delta\mu_{п}/2$. Таким образом, зная положение точки В и величину $\Delta\mu_{п}$, можно найти положение точки В'. Теперь для определения

положения произвольной точки кривой вязкости M' достаточно вычислить величину $\Delta\mu_M$, для определения которой предлагается следующее соотношение:

$$\Delta\mu_M = \frac{\Delta\mu_{II}}{2} \left(\frac{\Delta\omega_M}{\Delta\omega_{II}} \right)^2. \quad (4.2)$$

Для построения искомой кривой вязкости необходимо к каждой точке кривой АВ прибавить величину $\Delta\mu_M$. Эту операцию можно выполнить графически, так как кривая АВ строится по опытным данным, а $\Delta\mu_M$ вычисляется аналитически.

Этот метод применим только при небольших изменениях температуры (не более 3⁰С) и, соответственно, небольших изменениях вязкости.

Система контроля скоростей сдвига с двумя независимыми каналами, блок контроля мощности привода и дублированная система контроля давления осуществляли непрерывную запись сигнала, причем частота опроса – 5 мс.

Тарировку системы выполняли на химически чистой воде с проверкой по керосину КТ-1ГОСТ 13032 и ПМС10 ГОСТ 13032-77. Для воды и ПМС10 снимали вязкостная кривая, погрешность не превышала 4.6% в диапазонах давлений от 1 до 50 МПа

4.5.3 Разработанная система контроля состояния жидкости в щелевых каналах высоконагруженных узлов металлургического оборудования

Анализ информационных источников показывает, что до 90 % отказов узлов трения и 70-80% неисправностей гидравлических систем вызваны наличием твёрдых инородных частиц в рабочих средах и смазывающих материалах.

Обычно, загрязнителем являются инородные частицы, нерастворимые продукты износа гидравлической системы и частицы, образовавшиеся при окислении гидравлического масла [228]. Процессы полимеризации рабочей среды, как обратимые, так и необратимые возможные в зазорах пар трения и

гидравлических приводах игнорируются. В тоже время, результаты проведенных Золотых Е.В. в ВНИИФТРИ [69] исследований, показали наличие резкого возрастания вязкости ПФМС-2 при температуре 20°C, при давлении 200 МПа, аналогичное поведение фиксировалось и для ПФМС-4 при той же температуре, но при давлениях несколько ниже 100 МПа в больших объемах. Мс -20 при аналогичной температуре имеет точку скачкообразного изменения вязкости при давлении 260 МПа. В работах Ахматова А.С. [55], Ершова Б.И. [152] описываются физико-химических эффекты, наблюдавшиеся в пограничных слоях углеводородов при давлениях гораздо более низких, чем давления фазовых переходов фиксируемые в больших объемах тех же рабочих сред. Наиболее распространённые смазки являются растворами малой концентрации жирной кислоты в неполярной среде (масле). Исследования Ахматова А.С. показали, что при повышении давления стеариновой кислоты в зазорах с малой скоростью нарастания давления, наблюдается скачкообразное возрастание упругости, при давлениях значительно ниже давлений структурных переходов в больших объемах. Исследования проводили по методу Блоджет–Ленгмюра [55].

Поэтому изучение механизма структурных переходов базовых углеводородных сред в малых зазорах элементов гидравлических систем металлургических машин и оценка увеличения усилий в золотниковых парах должна производиться с учётом геометрического фактора толщин слоёв. Принимая во внимание тенденцию уменьшения размеров зазоров в элементах золотниковых пар, изучение физико-химических процессов, протекающих в приграничных зонах поверхностей, становится крайне актуальным.

Рассматривая вопросы «заращивания» отверстий малого диаметра, эффекты резкого возрастания усилия страгивания золотников при эксплуатации в гидравлических приводах высокого давления, как правило, имеют в виду явления облитерации. При этом наличие фазовых переходов зачастую игнорируется. Не учитывается влияние на фазовые переходы загрязнений. В то же время отмечается различный характер влияния загрязнений разного размера на функционирование оборудования. Подобное различие влияния на характеристики рабочих сред в

малых зазорах пар трения, оказывают и временные полимерные структуры в зависимости от состава и геометрического фактора. Определённую сложность вызывает обратимость полимеризации или поликонденсации в определённых условиях в зависимости от природы мономеров. Ряд соединений образуется необратимыми процессами полимеризации или поликонденсации. Причем обратимость процесса поликонденсации прежде всего обусловлена образованием побочных низкомолекулярных продуктов реакции: воды, аммиака, спирта, хлористого водорода и т.д., но при процессе обратимой полимеризации побочные продукты не образуются. Как процессы полимеризации так и процессы поликонденсации протекают с разной скоростью в зависимости от величин давлений и температур, то динамические процессы характерные для высоконагруженных пар трения гидроприводов высокого давления стимулируют данные процессы, повышая вероятность их возникновения, поэтому стоит рассматривать подобные явления как локальные аномалии изменения состава и свойств рабочей среды.

Необходимо рассмотреть и влияние размеров зазора прецизионных пар трения на процессы полимеризации рабочей среды. Многокомпонентные гидравлические масла включают в себя различные углеводородные соединения, обладающие разной молекулярной массой, низкомолекулярная часть которых выступает в роли жидкого носителя и своеобразной смазки для высокомолекулярных соединений, размеры которых зачастую не намного меньше или даже равны размерам зазоров между прецизионными парами трения. Попадание подобных высокомолекулярных частиц совместно с потоком низкомолекулярных соединений в зазоры, например, золотниковых пар и последующее вытеснение из зазора низкомолекулярных соединений под действием сдвиговых напряжений, образующихся при перемещениях золотника, сопровождается дальнейшим накоплением в зазоре высокомолекулярных соединений, размеры которых близки к размерам самого рабочего зазора золотниковой пары.

При накоплении данных высокомолекулярных соединений в рабочем зазоре возможно в случае резкого скачка давления образование из них временных или даже постоянных полимерных структур, что приведет к залипанию или заклиниванию золотниковой пары. Так, при изучении утечек в зазорах гидроаппаратов [144, 152] были получены экспериментальные данные (рисунок 4.28).

Кроме того, при создании экспериментальных установок ставилась цель проверки возникновения эффектов «склеивания» прецизионных плунжерных пар.

Были созданы две установки для исследования влияния физико-химических эффектов в зазорах.

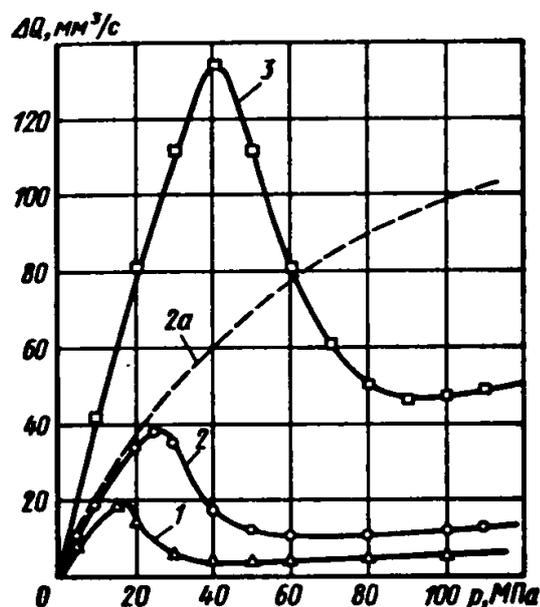


Рисунок 4.28 – Изменение величины утечек рабочей жидкости в зависимости от давления в статических условиях при радиальных зазорах 11 (кривая 1), 13 (кривая 2), 19 мкм (кривая 3); кривая 2а – теоретическая зависимость утечек от давления при зазоре 13 мкм; данные Б.И. Ершова [152].

Гидравлическая схема НГР 2000 была изменена. В установке НГР (рисунок 4.29) привод плунжерных пар выполняет эксцентриковый механизм, причем подъем эксцентрика приводит к перемещению рабочего плунжера и вытеснению порции рабочей среды через обратный клапан потребителю, возврат плунжера

осуществляется пружиной. Используя эту особенность установки, имитация условий схватывания производилась путем плавного повышения давления в ресивере 16 за счет повышения производительности плунжерных насосов 7 и перепуска дросселем 11. Частота вращения эксцентрикового вала соответствовала 1000 об/мин. Давление в ресивере фиксировали манганиновые манометры (точность 0.01 МПа в диапазоне от 1 до 500 МПа), давление открытия отсечных клапанов определяли экспериментально (было равно 0,3 атм). Исследования проводили на чистом керосине КТ-1ГОСТ 13032, керосине, загрязненном порошком ферромагнетика с размером одиночной частицы 0.1 мк [250], керосине с добавкой от 0.1 до 1 % масла М8, И20, ТАД 17, чистом дизтопливе ГОСТ 305-82 (летнее, зимнее, арктика), чистом дизтопливе ГОСТ Р 52368-2005 тип III, дизтопливе, имеющем упомянутые загрязнения.

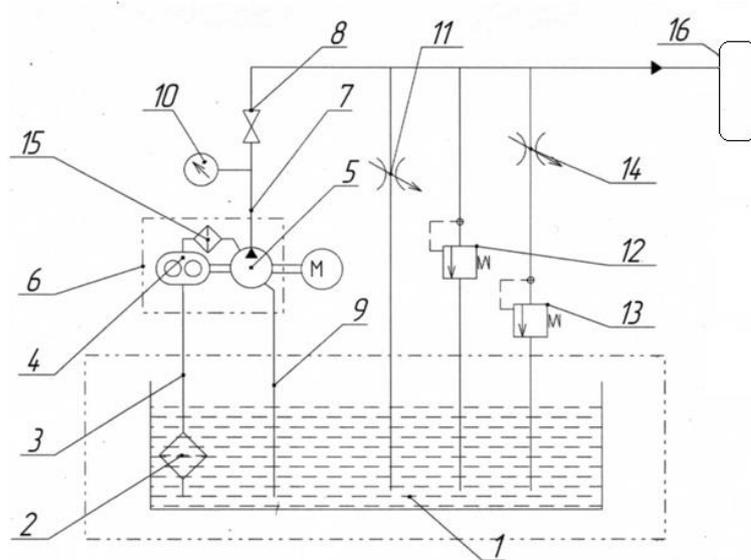


Рисунок 4.29 – Схема установки

Ниже приведена методика проведения испытаний

Гидравлическая система промывалась бензолом с заменой фильтроэлементов и прокачивалась исследуемой жидкостью без создания избыточного давления по рециркуляционной схеме до момента достижения 7-го

класса чистоты по стандарту NAS. После начиналось ступенчатое повышение давления с использованием разомкнутой системы подачи жидкости. Поскольку процессы кавитации при значительных перепадах давления способны приводить к физико-химическим эффектам, то жидкость, прошедшая элемент 11, обратно в систему не попадала. Давление поднимали до 200 МПа с шагом 1 МПа и выдержкой под давлением 60 секунд. Давление «схватывания» фиксировали по резкой потере производительности и невозможности сжатой пружине вернуть плунжерную пару в исходное состояние. Далее эксперимент повторяли со следующей плунжерной парой. После фиксации разбирали стенд и плунжерные пары, фиксировали повреждения, зазоры. Для определения эффекта намагниченности на работу плунжерных пар одна из пар была намагничена до значения магнитной индукции 9,2 мТл (определяли прибором ИМП-6), проведены замеры как на чистых средах, так и на загрязненных, в том числе и комбинированными загрязнителями как с кремнием, так и с окисью железа [251].

Необходимо заметить, что большинство конструктивных схем установок, созданных исследователями, работавшими в этом направлении, реализовывало перепад давления на золотниках, что не дает возможности полностью исключить движение в золотниковом зазоре частиц загрязнений. Кроме того, данные о распределении давления в зазоре плунжерной пары показывали целесообразность помещения всей измерительной ячейки в полость высокого давления, что и было реализовано в нашей установке. Исследовали плунжерную пару наружным диаметром золотника 5,5 мм, длиной рабочей части 20 мм при зазоре 15 мкм с допуском на размер 4 мкм. В этих условиях статическое давление в зазоре 15 мкм плунжера равномерное и могло изменяться от 10 до 200 МПа, при этом доля динамического перепада давлений в зазоре, по данным работы [227], не превышала при исследуемых режимах 0.7-0.9 МПа. Привод золотника осуществляли возвратно-поступательно катушками с фторопластовой изоляцией, не залитыми компаундом, контроль положения плунжера реализован по схеме трехкатушечного индукционного датчика перемещения, катушки которого также имели открытую фторопластовую изоляцию. Для определения мощностной

характеристики в цепь силовых катушек установлены токовый датчик ИС ACS712, модуль опроса датчика положения типа LS5-15/10-232-2-V-(12-24)-A. По значению токового сигнала, напряжения на катушке и положения сердечника производили расчет вольт-амперной характеристики, влияния зазора учитывали путем сравнения с эталонной характеристикой, полученной при установке вместо плунжера дистанционного стержня диаметром 3 мм равной с плунжером длины. Рабочий ход плунжера не регулируемый и составляет 3 мм, допускаемая частота перемещения – 1-100 Гц. Поправка на изменение сопротивления обмотки вносилась по результатам статического нагружения, давление в контейнере оценивали манганиновыми манометрами, включенными по схеме моста сопротивлений и работающими с блоком преобразования на инструментальном усилителе НХ711. Измерительный модуль, помещаемый в предварительно заполненную жидкостью камеру высокого давления, имеет длину 130 мм, диаметр – 28 мм, зона токовыводов служит крышкой блока высокого давления.

Экспериментальная установка (рисунок 4.30) состоит из управляющих магнитов 1, плунжера 2 и датчика положения 3, данная конструкция измерительного модуля в сборке помещается в мультипликатор высокого давления (рисунок 4.31). Мультипликатор высокого давления содержит камеру высокого давления 1, плунжер 2, камеру низкого давления 3, запорный элемент 4, насос 5, манометр 6, поршень 7 и воздушную камеру 8. Изменения вязкости рабочей среды в зазоре с ростом давления в системе оценивали измерением потребляемой мощности электромагнитом, требуемой для осуществления перемещения плунжера. А характер перемещения оценивали индукционным датчиком положения, жестко связанным с плунжером.

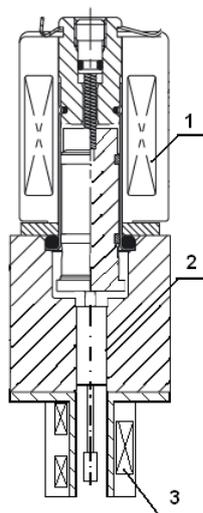


Рисунок 4.30 – Конструкция измерительного модуля

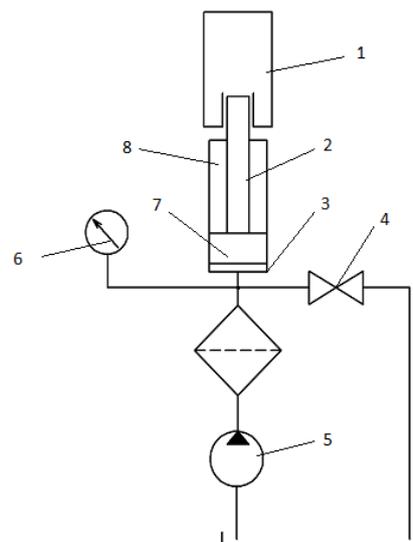


Рисунок 4.31 – Мультипликатор высокого давления

В качестве рабочей среды, заполняющей рабочий зазор пары трения, использовали образцы масел И-30 и АМГ, являющиеся по своему химическому составу многокомпонентной углеводородной системой с комплексом неорганических присадок. Класс предварительной очистки 7 по стандарту NAS исключал наличие абразивного износа в исследуемом зазоре.

4.5.4 Усовершенствованная система контроля физико-химического состояния рабочих сред в зазорах при объёмном нагружении высоким давлением

Одной из проблем, возникающих при исследовании состояний рабочих сред, является различное поведение среды в больших объемах и малых зазорах, как правило, в больших объемах жидкость переходит в твердое состояние не мгновенно с образованием аморфных структур, иначе именуемых аморфными стеклами. При стекловании значительно возрастает вязкость жидкости, что уменьшает подвижность молекул и в ряде случаев может препятствовать образованию кристаллической решетки. При этом необходимо учитывать, что для процесса стеклования характерен определенный интервал давлений, соответствующий фиксированной температуре. Анализируя данные

экспериментальных исследований [70], можно отметить, что нет четкого понимания, при какой вязкости вещество следует считать твердым, обычно принимается значение динамической вязкости более, чем 10^4 Па·сек. В этих условиях уже невозможно определять вязкость жидкости методом «катящегося шарика». В капиллярных вискозиметрах в этих условиях наблюдается потеря чувствительности систем контроля давления (манганиновые манометры могут выходить из строя). Ротационный вискозиметр при вязкости 10^3 Па·сек блокирует движение подвижного элемента. Все перечисленные приборы позволяют получить сведения об объемной вязкости и не пригодны для определения локальной вязкости в малых зазорах. В то же время метод определения давления физико-химических превращений, пригодный для исследования поведений жидкости в зазорах от 10 мкм, был предложен Атановым Ю.А.. В основе методики определения давления фазового перехода жидкости в зазоре использован метод измерения диэлектрических потерь [252]. Сущность метода заключается в пропорциональности вязкости времени диэлектрической релаксации [69]:

$$\tau = \frac{4\pi R^3}{kT} \eta, \quad (4.3)$$

где k – постоянная Больцмана; τ – время диэлектрической релаксации; T – температура; η – вязкость; R – радиус молекулы.

Давление при достижении вязкости 10^4 Па·с, соответствует гарантированной потере подвижности плунжерных соединений, поэтому это значение принималось за опорное.

При дальнейшей подстановке значений $T=300\text{K}$, $R=10^{-10}$ м, $\eta= 10^4$ Па·сек получаем $\tau \approx 10^{-4}$ сек, что действительно соответствует переходу поляризованной системы в неполяризованное состояние.

$$\tau = \frac{1}{2\pi\nu_\tau} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_\infty}}, \quad (4.4)$$

где ε' – статическая диэлектрическая проницаемость; ε'_∞ – неполярная часть диэлектрической проницаемости; ν_τ – частота внешнего электрического поля, соответствующая максимуму тангенса угла наклона диэлектрических потерь. Таким образом, наличие критического возрастания вязкости определяется по оценке достижения ε'_∞ максимальных значений при частотах внешнего электрического поля порядка 10^3 Гц. Данный метод дает хорошие результаты для полярных жидкостей, хотя пригоден и для неполярных при наличии в последних полярных присадок. Поскольку большинство применяемых рабочих жидкостей содержит пакеты, как правило, полярных присадок, то метод весьма актуален. Для кристаллизующихся жидкостей, по мнению Золотых Е.В., весьма перспективен метод замера электрического сопротивления, резкий рост которого для ряда эмульсий соответствует давлению затвердевания [75].

Рассматривая оборудование для исследования диэлектрических характеристик, следует отметить, что это, как правило, цилиндрические конденсаторы с достаточно большой величиной зазора между обкладками (рисунок 4.32) и, по данным Золотых Е.В., зазор имел порядок от десятых долей до нескольких миллиметров. Таким образом, оценивалось изменение состояния вещества в относительно больших объемах [253]. Для оценки состояния вещества в зазоре, близком по величине к зазору плунжерных пар, необходима была измерительная ячейка меньших объёмов. В качестве измерительной ячейки применён плоский конденсатор. Пластины электродов, выполненные из стали ХВГ, разделенные по периметру на 10% своей площади фторопластовой пленкой толщиной 10 микрон, и удерживаются в обоймах из фторопласта ф-4. Конденсатор помещали в измерительную полость, где создавалось избыточное давление. Замеры осуществляли в диапазоне низких (до 800 Гц) частот.

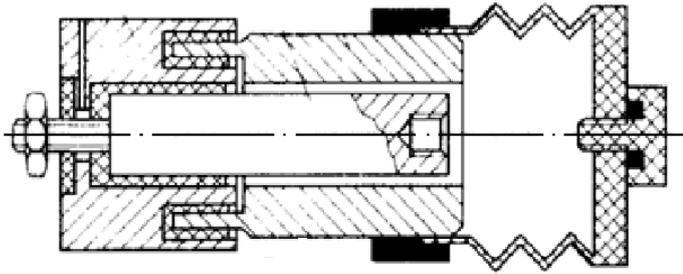


Рисунок 4.32 – Измерительный конденсатор с цилиндрическим зазором [243]

Удельная электрическая проводимость

$$\gamma = \varepsilon_0 \frac{C}{C_0}, \quad (4.5)$$

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; C_0 – электрическая емкость незаполненного конденсатора.

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 и контрольную калиброванную емкость.

Блок из пластин, разделенных фторопластовой пленкой, установленный во фторопластовые обоймы, монтировали на измерительной ячейке (рисунок 4.33), токовводы которой выполняли на шеллаке, армированном стекловолокном и прослойкой окиси железа – этим достигалась электроизоляция ввода. Измерительный комплекс и ячейка соединены коаксиальным кабелем с разъемами CR50-70.

При калибровке конденсатора использовали методику Золотых. Сначала определяли емкость незаполненной ячейки с электровводом и кабелем. Затем ячейку заполняли бензолом и измеряли емкость собранной и установленной ячейки. Вакуумная емкость конденсатора оценивалась как отношение разности емкостей заполненной и сухой ячейки и разностей диэлектрических проницаемостей бензола и воздуха.

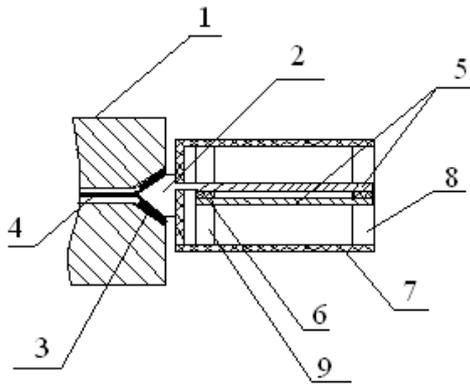


Рисунок 4.33 – Схема измерительной ячейки:
 1 – дно камеры высокого давления; 2 – токоввод; 3 – изолятор токоввода; 4 – измерительный кабель; 5 – пластины конденсатора;
 6 – дистанционная прокладка; 7 – трубчатая направляющая; 8, 9 – дистанционные полукольца

Следует отметить, что под действием давления даже при постоянной температуре емкость будет меняться в результате изменения геометрии ячейки:

$$c = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (4.6)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь пластины; δ – расстояние между пластинами.

Таким образом, необходимо учесть возникающую погрешность при изменениях длины, ширины и зазора:

$$\Delta L(P, t) = L(0, T_0) \left[1 - \frac{p(1 - 2\mu)}{E} \right] [1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (4.7)$$

Здесь p – давление; μ – коэффициент Пуассона соответствующего материала; E – модуль Юнга; α – коэффициент теплового расширения.

Подстановка данных для стали и фторопласта показывает, что изменение размеров до давлений 500 МПа для длины, ширины составляет 0,15%, а изменение зазора – менее 0,3%, что дает суммарную погрешность менее 3,6%, а это меньше погрешности прибора, используемого в исследуемом диапазоне частот.

Ниже приведена методика проведения измерения

После заполнения исследуемой средой измерительной ячейки проверяли емкость при атмосферном давлении, которое затем плавно поднимали со скоростью 0,5 МПа/с, что позволяло избежать резкого роста температуры вследствие адиабатического сжатия. В ряде экспериментов нарастание давления производили со скоростью 10 МПа/с без выдержки времени на рассеивание адиабатного числа, но с контролем температуры. При достижении заданного

давления снимали показания емкости конденсатора. В экспериментах в качестве измерительных приборов применяли измеритель-самописец УТ-71В, двухканальный генератор сигналов МНС-5200А. Во всех случаях определяли средние значения величин из серий трех измерений. Данные обрабатывали методом наименьших квадратов, калибровку производили по эталонным жидкостям, дистиллированной воде и бензоле, максимальная ошибка в исследуемом диапазоне давлений не превышала 4,2%.

4.6 Выводы по главе 4

1. На основании данных простоев с 2016-2018 годы металлургического оборудования ОАО «ПНТЗ» г. Первоуральск, произведена оценка критичных зон первичной и углублённой диагностики.
2. Апробирована разработанная система объёмного контроля температуры объекта по внешним тепловым полям. Упрощённая методика обладает погрешностью определения температуры $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение первых 60 секунд с дальнейшим возрастанием погрешности до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 800 секунд. Разработанная методика определения температур по результатам изменения температурных полей на поверхности показала высокую эффективность. Метод подтвержден актами испытаний и внедрения на металлургических предприятиях, отраженными в публикациях [127, 236, 243, 245].
3. Разработан блок первичной вибрационно-акустической диагностики объекта с аналоговым выделением частотных диапазонов 40 кГц и 1 кГц. Система визуализации блока позволяет как выделять сигнал в частотных спектрах одновременно по двум каналам, сравнивать вибрационный и акустический сигнал, так и локализовать зону дефекта.
4. Модернизированы системы контроля давления рабочих жидкостей. Схема с термостатированными уравнивающими сопротивлениями позволила определять величину рабочего давления в системе с точностью до 0.01МПа при уровне давлений от 0.1 до 500 МПа с временем опроса менее 3 мс. Разработана система автоматической регистрации параметров экспериментального оборудования. Система выполнена с использованием

прецизионного инструментального усилителя AD620B с низким уровнем собственных помех и аналого-цифровой преобразователя серии ЛА-50. Автоматизированная обработка данных производилась в пакете прикладных программ National Instruments LabVIEW 2010. Система обеспечила полную автоматизацию сбора и обработки данных.

5. Разработан универсальный модуль диагностики состояния углеводородных растворов, позволяющий проводить оценку свойств исследуемых сред в диапазоне давлений 0.1-500 МПа, что полностью перекрывает диапазоны давлений рабочих сред как в существующих, так и в перспективных теплогидравлических агрегатах металлургического оборудования. Комплекс включает разработку следующих подсистем:
 - А) Разработан капиллярный вискозиметр для исследования характеристик углеводородов в диапазоне давлений 100-500МПа.
 - В) Разработан ротационный вискозиметр для исследования характеристик углеводородов в диапазоне давлений 0.1-500 МПа, позволяющий определять кривую вязкости углеводородов и исследовать как ньютоновские, так и неньютоновские жидкости. Погрешность определения вязкости не превышает 4.6% в диапазонах давлений от 1 до 50 МПа.
 - С) Разработана установка и методика исследования трения в зазорах плунжерных пар при давлениях рабочей среды до 200МПа.
 - Д) Разработана установка исследования химической стабильности рабочих жидкостей. Разработана методика оценки химической стабильности рабочих жидкостей и смазочных материалов путем оценки диэлектрической проницаемости в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления до 200 МПа, позволяющая определять предельные режимы эксплуатации металлургических машин и агрегатов. Разработано оборудование и методики определения характеристик углеводородов в объеме и в зазорах в диапазоне давлений 100-500 МПа.

Глава 5 Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований рабочих сред в высоконагруженных элементах металлургического оборудования

Для выявления причин периодических параметрических отказов системы противоизгиба валков прокатного стана листопрокатного цеха №1 АО «Уральская Сталь» был проведён ряд численных и натурных экспериментов. 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.

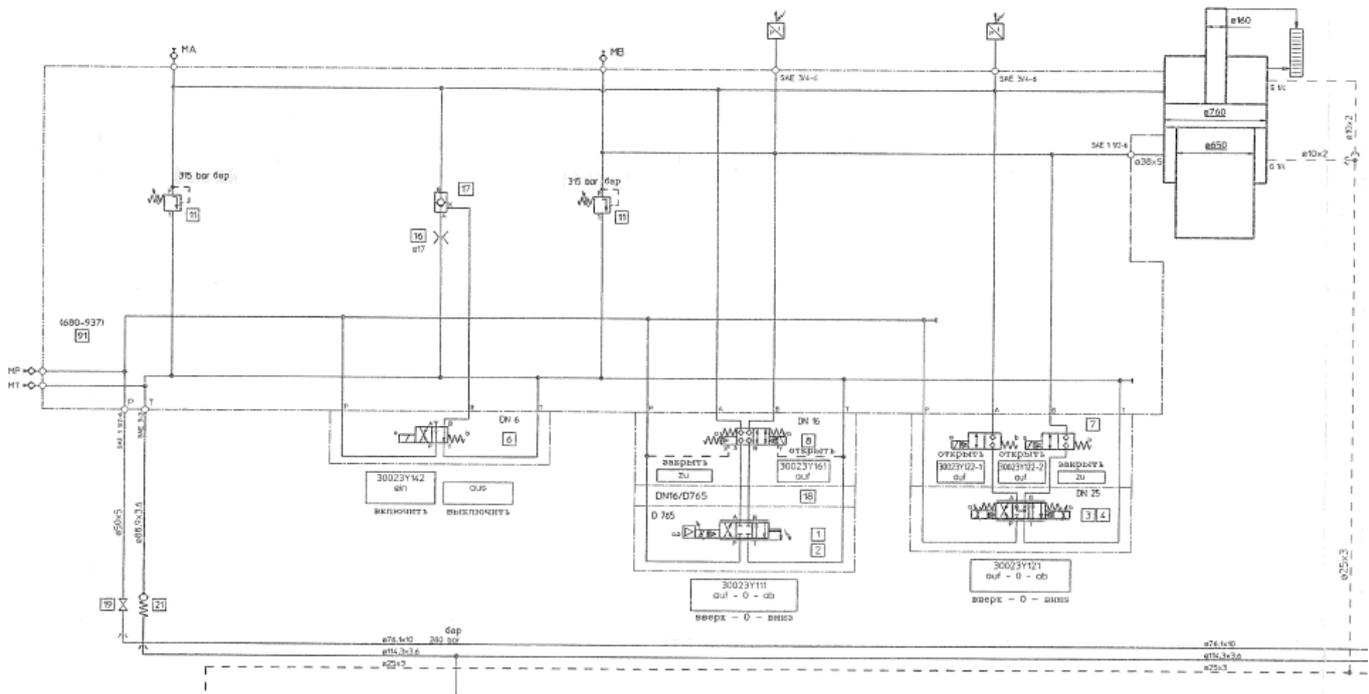


Рисунок 5.1 – Гидравлическая схема системы противоизгиба валков реверсивного одноклетьевого прокатного стана кварты.

Спецификой гидравлических систем металлургического оборудования является наличие в качестве внешнего загрязнителя частиц окислов железа, а также значительная длина подводных магистралей, что создаёт

ухудшенные условия для эксплуатации гидравлических приводов и способно значительно менять быстродействие системы.

Для выявления причин изменения скорости перемещения золотников в гильзах распределителей, элементов систем управления металлургического оборудования производились:

- оценка изменения вязкости рабочих сред в диапазонах давлений до 200 МПа;
- определялось влияние твердых загрязнителей и электромагнитного поля на кинематическую вязкость полимерных растворов с комплексом присадок, в том числе и обладающих магнитными свойствами;
- выявлялись условия потери подвижности плунжерных пар;
- моделировались параметры функционирования пары гильза – золотник второй ступени сервоклапана системы противоизгиба валков прокатного стана АО «Уральская Сталь».

1. При проведении численных экспериментов использовалась модифицированная модель течения, описанная в третьей главе. Проверка достоверности результатов расчётов модифицированной модели производилась путём сопоставления полученных значений коэффициента трения для каналов с резким ступенчатым изменением проходного сечения, для гладких щелевых каналов, для течения Куэтта в диапазоне избыточных давлений от 0 до 200 МПа с экспериментальными данными. Кроме того, сравнивали результаты численного моделирования в программных комплексах COSMOSFloWorks и Ansis со стандартными методиками описания вязкости. Подводя итог проверке адекватности предлагаемой модели в области «простых» неаномальных течений, можно отметить, что полученные данные позволяют использовать предложенную модель для инженерных расчетов. Результаты подтверждены патентами, актами испытаний и внедрения на металлургических предприятиях, отражены в публикациях [249,272, 261, 262].

Каких-либо недостатков, а также преимуществ перед моделями, примененными в программных комплексах COSMOSFloWorks и Ansis, не

выявлено, сравнение с данными натуральных экспериментов показывает как минимум удовлетворительную точность. Совершенно другая ситуация наблюдается при сравнении предлагаемой модели с аналогами при расчетах движения жидкости с дисперсной фазой, а также при расчетах движения углеводородов в зонах, соответствующих зонам фазовых переходов. Проверку адекватности производили имитацией течения в программных комплексах AnsisCFX и COSMOSFloWorks для ряда исследуемых жидкостей. Поскольку характеристики таких жидкостей, как глицерин и полисиликон хорошо известны, то моделирование движения жидкости в зазоре производили именно для них. Имитировали плавный рост давления от 1 до 300 МПа, температура процесса принималась равной 20° С (приложение Б).

5.1 Гидравлические характеристики рабочих сред при давлениях до 200 МПа

Описанные утверждения и закономерности подтверждаются серией проведенных экспериментов с рабочими жидкостями и маслами синтетического и минерального происхождения, в результате которых установлено, что вязкоупругие свойства жидкости проявляются даже при отсутствии в ней дисперсной фазы [136, 254-258].

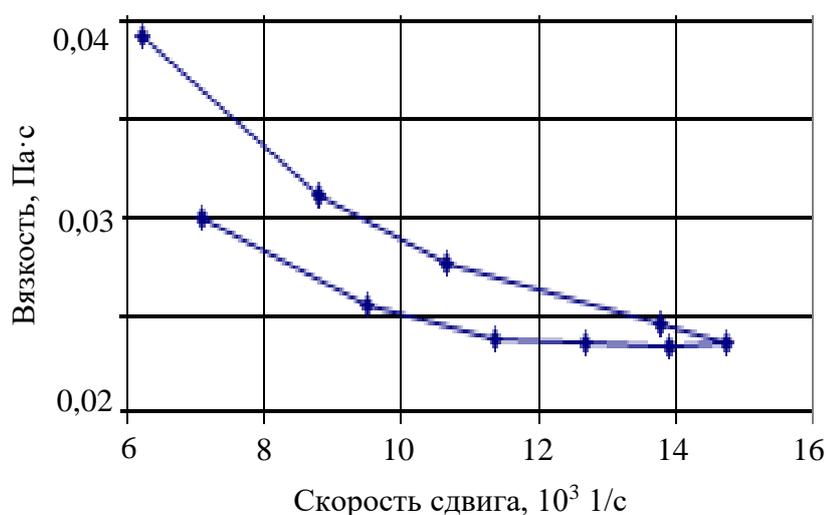


Рисунок 5.2 – Кривая вязкости масла VG-46 при начальной температуре 23,4° С и атмосферном давлении



Рисунок 5.3 – Зависимость динамической вязкости керосина при постоянной температуре $23,4^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении

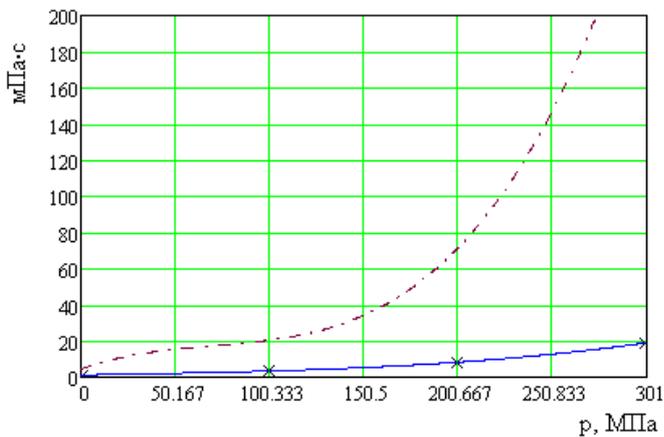


Рисунок 5.4 – Кривая вязкости керосина (нижняя) и 50% смеси керосин–веретенное масло (верхняя)

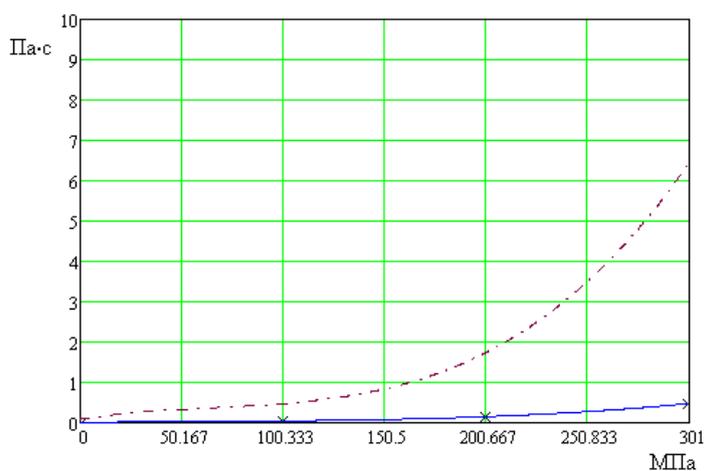


Рисунок 5.5 – Кривые вязкости ПМС 10 (нижняя) и ПМС 100 (верхняя)

Для поддержания постоянной температуры ротор вискозиметра останавливали после замера каждой точки. Данную характеристику использовали для тарировки.

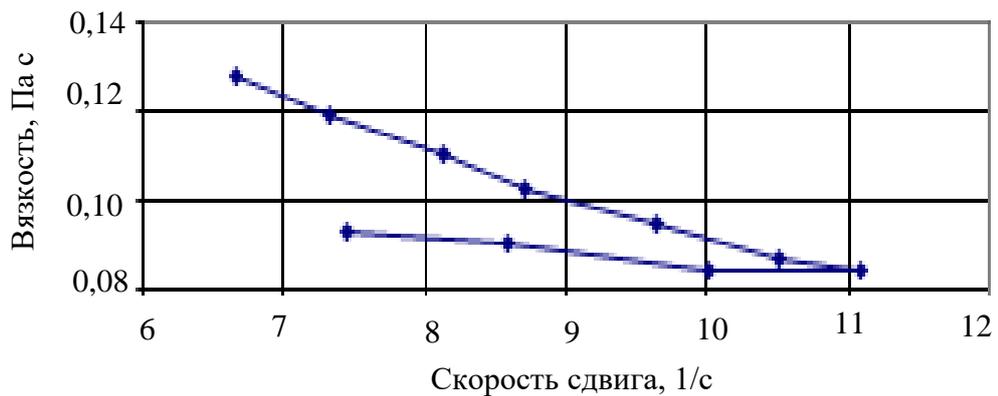


Рисунок 5.6 – Кривая вязкости полусинтетического масла Agipsyntetic при начальной температуре 24,0 °C и атмосферном давлении

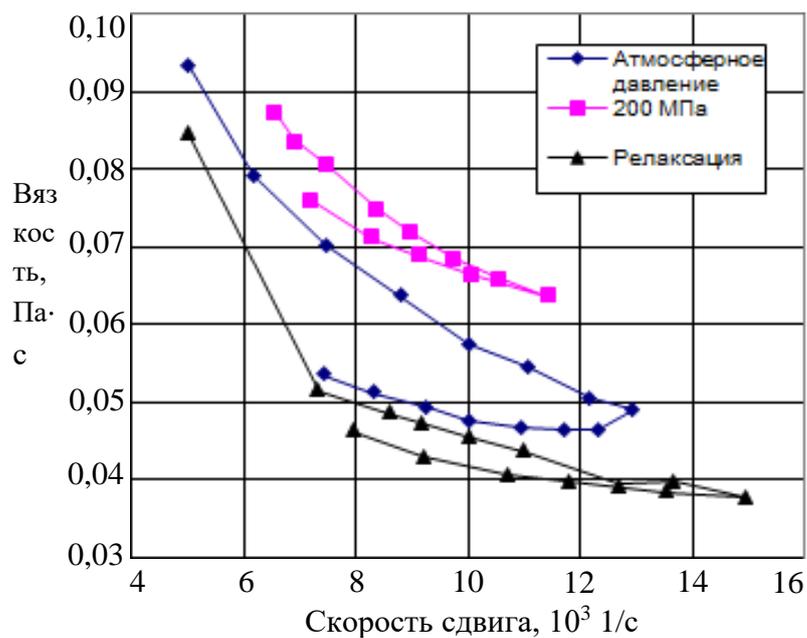


Рисунок 5.7 – Кривые вязкости полусинтетического масла MitsubishiDiaQueenATFSP3 при начальной температуре 24,0 °C

График «Релаксация» показывает кривую вязкости сразу после резкого сброса давления с 200 МПа до атмосферного.

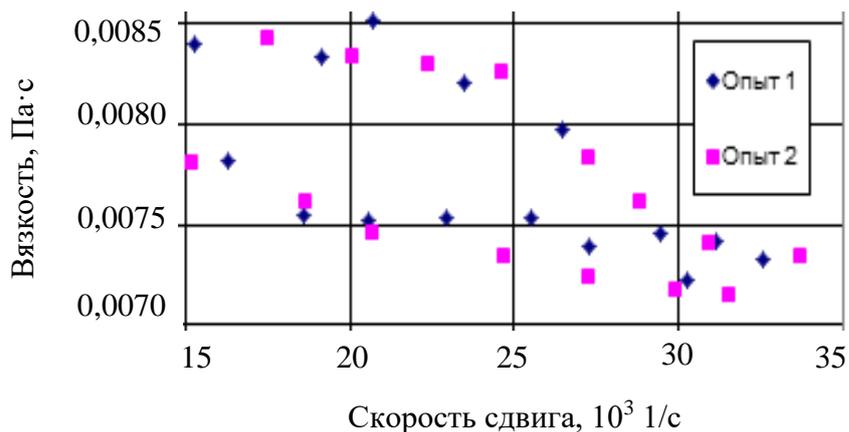


Рисунок 5.8 – Иллюстрация погрешности оценки вязкости летнего дизельного топлива при начальной температуре 24,0°С и атмосферном давлении при разгых скоростях сдвига.

Измерения для графика «Опыт 2» проведены через 10 минут после окончания измерений для графика «Опыт 1».

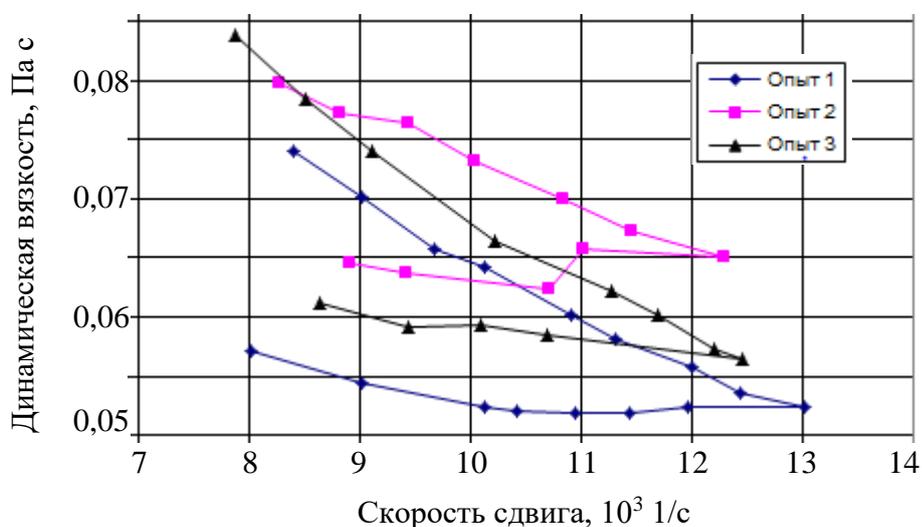


Рисунок 5.9 – Кривая вязкости полусинтетического масла для АКПП Castrol automatic при начальной температуре 24,0 °С

График «Опыт 1» построен при атмосферном давлении. График «Опыт 2» – сразу после сброса давления с 200 МПа до атмосферного. График «Опыт 3» – через 20 минут после сброса давления.

Графики зависимости вязкости от скорости сдвига представлены на рисунках 5.2-5.9, 5.12-5.14. Жидкость предполагалась очищенная, соответствовала классу 16/14 /12 согласно ISO 4406.

Приводимые данные были получены путем обработки серий экспериментов, проведенных в максимально сходных условиях. Скорость повышения давления поддерживали одинаковой во всех сериях для исследуемой жидкости, замеры проводили при одинаковых скоростях сдвига, длительность периодов изменения частоты вращения выбирали равной. Приводятся данные среднеквадратичных значений, соответствующие фиксированным скоростям сдвига. Методика оценки принадлежности данных к одной совокупности проводилась путем расчета критерия Стьюдента. Методика учета поправок на нагрев жидкости приведена ниже.

Для подтверждения качества тарировки полученные на ротационном вискозиметре данные сравнивали с данными экспериментов Золотых, использовавшей шариковый вискозиметр, частоту вращения подбирали по критерию Re (в экспериментах Золотых $Re = 6$). Полученные нами данные укладывались в 7% диапазон погрешности экспериментов Золотых.

На приведенных кривых вязкости для различных масел видно, что ветви кривой, построенные при увеличении и при уменьшении скорости сдвига, не совпадают. Причиной этого является нагрев исследуемой жидкости при неизбежном рассеянии тепла в ней во время проведения испытаний. Этот процесс подробно изложен в работах [259-262].

Для изучения характера нагрева исследуемой жидкости в процессе работы установки было проведено несколько опытов.

В зазор между коаксиальными цилиндрами была помещена термopара, после чего измерительная система была помещена в емкость с дизельным топливом при температуре $19,25^{\circ}\text{C}$. После этого вискозиметр был включен, потребляемый ток установлен на уровне 2 А. В течение 90 с (среднее время проведения измерений при построении кривой вязкости) замеряли температуру исследуемой жидкости в рабочем зазоре вискозиметра. По результатам измерений

построен график (рисунок 5.10). Также была построена зависимость «вязкость– время» (рисунок 5.11) при постоянной потребляемой мощности, чтобы более наглядно продемонстрировать эффект нагрева жидкости.

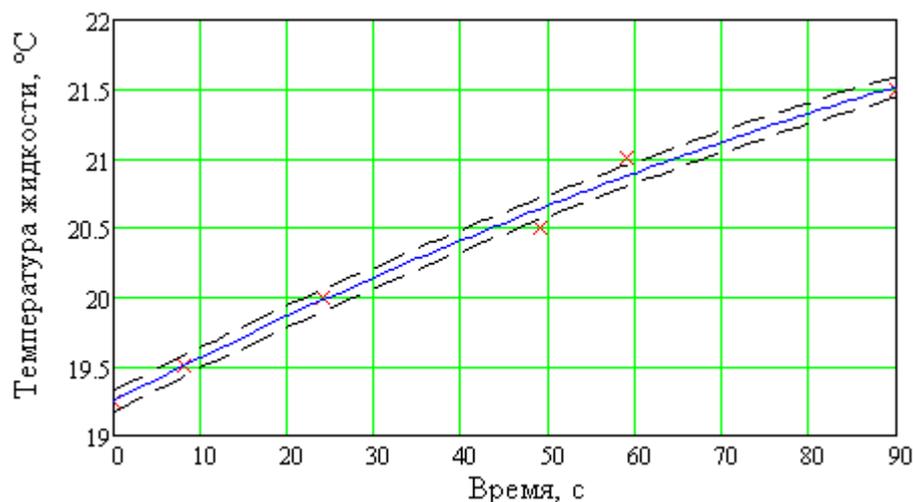


Рисунок 5.10 – Зависимость температуры исследуемой жидкости от времени при постоянной потребляемой мощности. Внутри зоны ограниченной пунктиром находится 68.2% выборки.

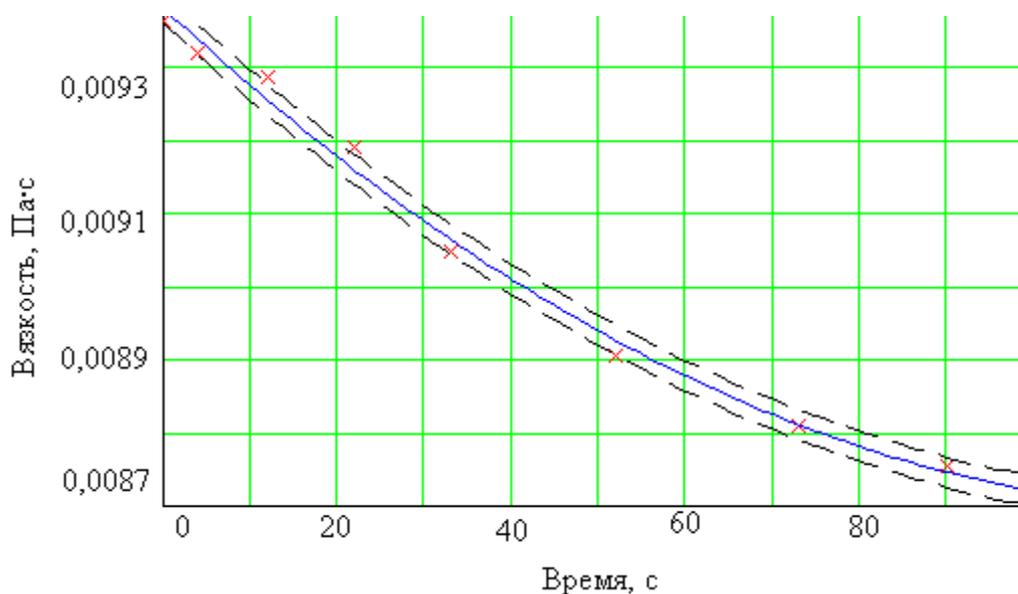


Рисунок 5.11 – Зависимость вязкости исследуемой жидкости от времени при постоянной потребляемой мощности. Внутри зоны ограниченной пунктиром находится 68.2% выборки.

Как видно из графика (рисунок 5.10), температура исследуемой жидкости растет линейно при постоянной потребляемой мощности. При построении кривой вязкости приводная мощность равномерно повышается, поэтому зависимость

«температура жидкости–время», очевидно, будет иметь квадратичный вид. Эффект нагрева исследуемой жидкости сильно искажает результат измерений, использовалась описанная в главе 4 методика коррекции.

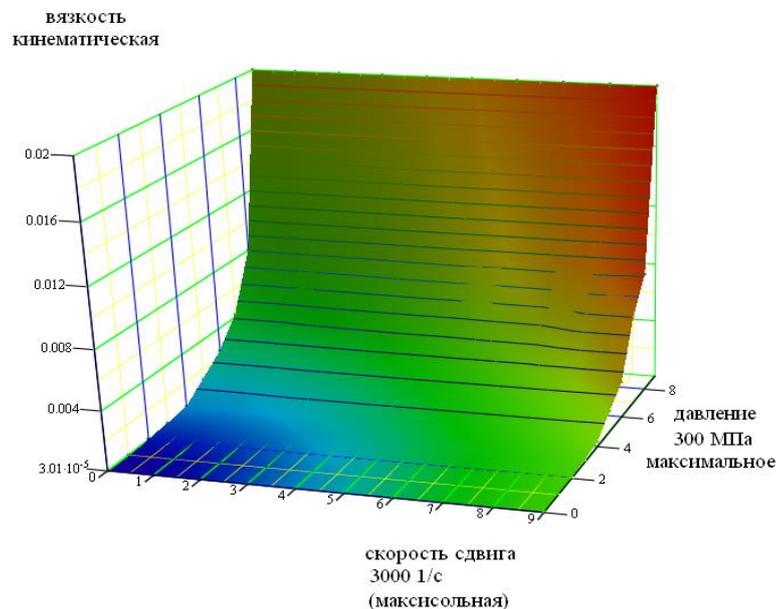


Рисунок 5.12 – Обработка данных по зависимости давление–скорость сдвига–вязкость для масла ИГП

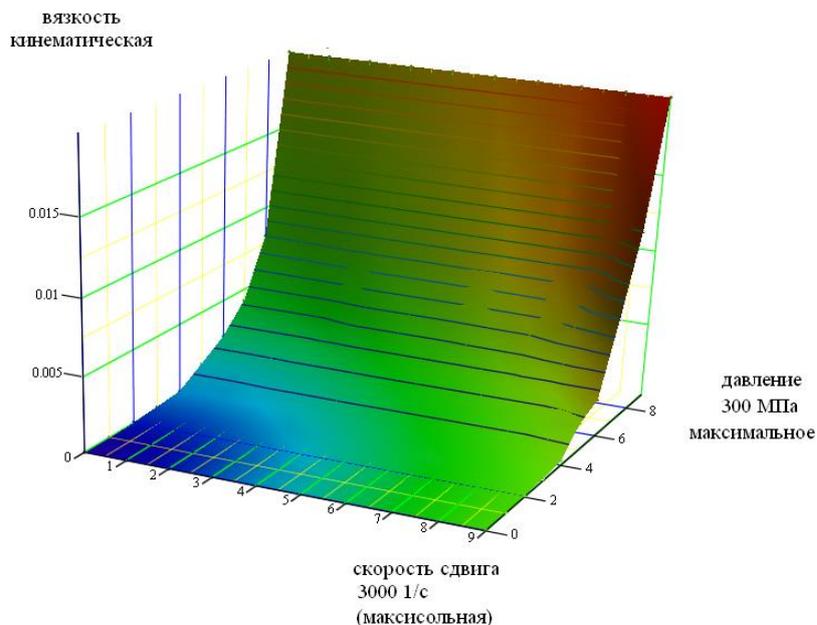


Рисунок 5.13 – Обработка данных по зависимости давление–скорость сдвига–вязкость для масла И-30

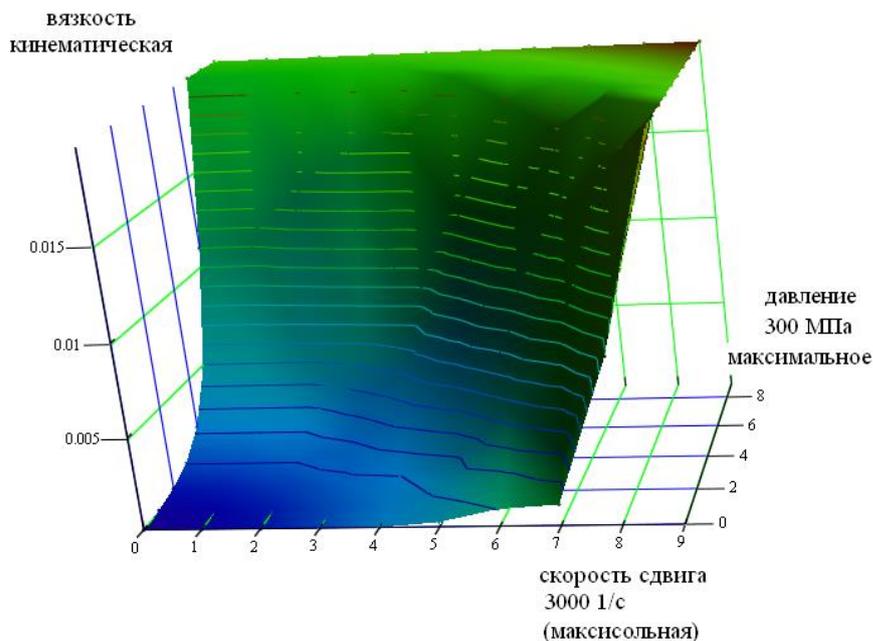


Рисунок 5.14 – Обработка данных по зависимости давление–скорость сдвига–вязкость для масла SHV 36

Отражено в публикациях [166, 223, 251, 253, 254, 255, 257, 258, 259, 260, 263, 265].

5.2 Анализ влияния загрязненности рабочих сред

Наиболее часто отказы гидравлических элементов металлургического оборудования связывают с наличием загрязнителей в рабочих средах. При этом основное внимание уделяется размеру инородных частиц, а не их природе. В то же время влияние частиц кремния более или менее равномерно распределённого по объёму и частиц ферромагнетиков, концентрирующихся в зазорах, может быть не равнозначным, в том числе и на вязкость среды в зазоре. Результаты этой части исследования приведены в работах [263-267]. Проводилась серия экспериментов по определению влияния твердых загрязнителей и электромагнитного поля на кинематическую вязкость полимерных растворов с комплексом присадок, в том числе и обладающих магнитными свойствами. Использовался раствор стиролакрилового полимера в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:5.

При сравнении кинематической вязкости полимерного раствора с вязкостью чистого керосина наблюдался значительный рост вязкости раствора вследствие приобретения жидкостью желеобразной структуры, что сделало невозможным определение кинематической вязкости в капиллярном вискозиметре, так как данный образец приобретал способность к течению только под действием значительного сдвигового напряжения. Подобное поведение раствора является следствием того, что стиролакриловый полимер имеет свойства растворяться в эфире, кетонах, ароматических и хлорированных растворителях, а так как в чистом деароматизированном керосине, получаемом путем глубокого гидрирования керосина, содержание ароматических углеводородов невелико и не превышает 7%, вследствие этого возможно растворение только небольшого количества полимера. Так как совместимость преобладающих в составе керосина алифатических углеводородов со стиролакриловым полимером ограничена, происходит неполное растворение полимера, поэтому остатки молекул полимера подвергаются набуханию. Это приводит к увеличению объема полимерных молекул, связанному с раздвиганием звеньев и цепей высокомолекулярных соединений благодаря проникновению в них низкомолекулярного растворителя, а набухший полимер, по сути, представляет собой раствор низкомолекулярной жидкости.

Подобное растворение с предварительным набуханием наблюдается у веществ с достаточно большой молекулярной массой, когда существует значительная разница в скоростях диффузии молекул смешиваемых веществ. На основе данной жидкости был получен полимерный раствор путем повышения объема керосина в растворе с 1:5 до 1:500. Это привело к потере вязкопластичных свойств, а еще один полимерный раствор получили путем растворения стиролакрилового полимера, обработанного ацетоном в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:5, который также не проявил вязкопластичных свойств.

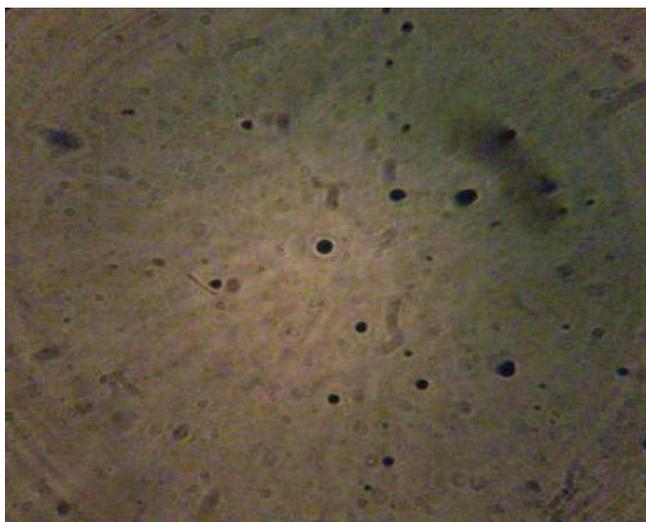


Рисунок 5.15 – Структура раствора стиролакрилового полимера в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:500

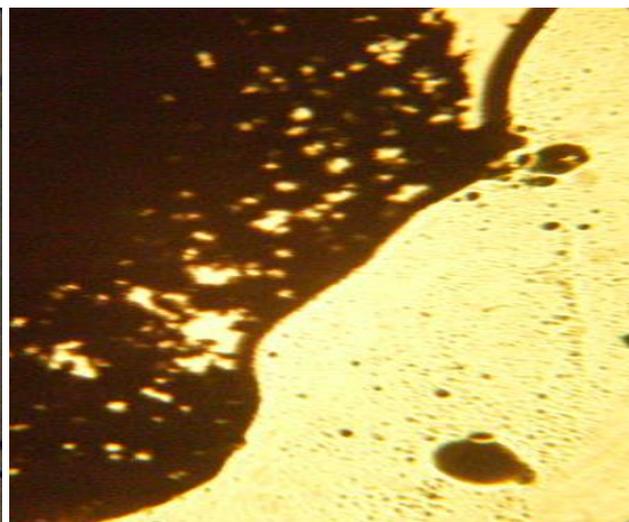


Рисунок 5.16 – Структура раствора стиролакрилового полимера, предварительно обработанного ацетоном в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:5

Кинематическая вязкость раствора стиролакрилового полимера в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:500 (структура представлена на рисунке 5.15) 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. При проведении подобных действий с раствором стиролакрилового полимера, предварительно обработанного ацетоном в керосине с присадкой на основе магнетита (Fe_3O_4) в соотношении 1:5 (структура представлена на рисунке 5.16), наблюдались следующие явления.

Вязкость полимерного раствора также стала ниже вязкости чистого керосина, эта разница составила 31,25%, но при внесении образца в переменное электромагнитное поле его вязкость снизилась на 18,18% по сравнению с вязкостью вне электромагнитного поля. Этот эффект позволил разработать ряд новых технических устройств, защищённых патентами [268, 238, 269]. Данные различия в изменении вязкостных свойств, а именно в отсутствии

вязкопластичных свойств у полученных растворов, можно объяснить в первом случае наличием в составе керосина достаточного для растворения стиролакрилового полимера количества ароматических углеводородов.

Во втором случае важную роль сыграла предварительная обработка полимера ацетоном, который относится к насыщенным кетонам, а следовательно, ацетон является неограниченно совместимым со стиролакриловым полимером. Но наблюдаемое падение вязкости является следствием введения в керосин присадки на основе оксида железа, обладающего магнитными свойствами.

Проведенные нами измерения вязкостных характеристик показали снижение вязкости при медленном повышении частоты вращения ротора, а после достижения заданного значения при медленном понижении частоты вращения ротора наблюдалась задержка обратного роста вязкости. Несовпадение кривых, полученных при повышении и последующем понижении частоты вращения ротора, свидетельствует о росте кинетической энергии системы, приводящем к повышению температуры среды, следовательно, о наличии локального нагрева тестируемой пробы.

Влияния на вязкость загрязнителя основе магнетита (Fe_3O_4) при размере частиц от 8 до 12 нм в отсутствие магнитного поля не выявлено.

Полученный эффект может приводить к скоплению на поверхностях гильзы и золотника более намагниченных, следовательно, с меньшим размером заряженных частиц и к локальным вязкостным провалам. Поэтому следует включать в расчет вязкости поправку. Сравнение производили с данными капиллярного вискозиметра. В результате проведенных экспериментов обнаружено, что вязкоупругое поведение жидкостей на базе углеводородов не зависит от наличия в жидкости дисперсной фазы загрязнителя. Но в случае использования в качестве загрязнителя магнетита вязкость значительно зависит от интенсивности магнитного поля.

5.3 Исследование поведения жидких углеводородов в зазоре с целью прогнозирования параметров состояния оборудования

Многочисленные параметрические отказы гидравлического оборудования 4-го и 8-го цехов ОАО «ПНТЗ», а также гидравлического оборудования листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь», возникавшие при импульсных забросах давления и обеспечении требуемой производителем степени очистки рабочей жидкости вызывались эффектами «склеивания» плунжерных пар. Поэтому поведение жидкости в зазорах плунжерных пар исследовали при нагружении не рабочим давлением, а давлением, предельным для отдельных зон данных систем.

2. Испытания, проводимые на плунжерных парах установки НГР 2000, показали следующие результаты. На чистом керосине (КТ-1) ГОСТ 13032, эталонном дизтопливе ГОСТ Р 52368-2005 тип III при поддержании 7-го класса чистоты по NAS вплоть до предельных давлений испытаний в 200 МПа схватывания поверхностей плунжерных пар не происходило. При исследовании товарного дизтоплива, соответствующего ГОСТ 305-82 летнее, наблюдалось 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 исследуемой среды. Совершенно иная ситуация выявилась при добавлении индустриального масла в исследуемые составы. Добавки масел М8, И-20 в концентрациях 0.1 до 1,0% при давлениях ниже 30 МПа ни на одном из исследуемых топлив при обеспечении заданной чистоты исследуемой жидкости «схватывания» не наблюдалось. Керосин (КТ-1) – наблюдалось устойчивое «схватывание» плунжерных пар при давлении 140-160 МПа при наличии концентрации масла выше 0,1% от массы жидкости. Интересно, но корреляции изменения давления «схватывания» от концентрации присадки выявить не удалось, при изменении концентрации менялась наработка до «схватывания» плунжерных пар, при этом при меньшей концентрации схватывание происходило, как правило, при наработке 2,0-2,5 часа. Минимальное время до «схватывания» наблюдалось при концентрациях 0.7% и составляло 32 секунды при давлении 155 МПа. Внесение присадки на основе магнетита (Fe_3O_4) при концентрации 0.001% (трехмикронный фильтр пропускал до 90% данного

вещества, магнитный уловитель демонтирован) при наличии намагниченной плунжерной пары сократило время «схватывания» при малых концентрациях до 400-700 секунд, уровни давлений схватывания в диапазоне 140-160 МПа не подчинялись нормальному распределению. Сходная картина наблюдалась и при работе на дизельном топливе ГОСТ Р 52368-2005 тип III с загрязнителями. Исследования показали в целом сходный характер поведения, но начальная зона схватывания оказалась на границе 135 МПа, эти данные отражены в публикациях [239,269, 238, 257, 264, 266, 267].

Поведение жидкости в зазорах плунжерных пар при нагружении гидростатическим давлением исследовали по изменению мощности, требуемой для перемещения плунжера в процессе работы плунжерной пары в зоне гидростатического давления. Чистота рабочей жидкости обеспечивалась предварительной фильтрацией до 8-го класса чистоты по NAS. Графическая зависимость (рисунок 5.17), представленная на основании полученных экспериментальных данных, показывает нелинейность изменений мощности, потребляемой системой для осуществления перемещения плунжера с ростом давления в системе, иллюстрируя тем самым нелинейность изменения вязкости рабочей среды в зазоре. Причем аномального изменения вязкости в большом объеме этой же среды не зафиксировано. Система контроля мощности оказалась чувствительной к состоянию пары гильза-золотник, что позволило использовать систему контроля мощности для диагностики состояния золотниковых распределителей (см. главу 6).

Из проведенного исследования становится очевидным, что игнорирование процессов полимеризации рабочей среды в пристеночной зоне зазоров золотников недопустимо.

Для подтверждения версии о прохождении физико-химических процессов в зазоре была поставлена серия экспериментов по определению диэлектрической проницаемости. Замеры производили для индустриального масла И-30 при зазорах 1 мм и 10 мк (рисунок 5.18, 5.19).

Необходимо отметить, что диэлектрическая проницаемость в малом зазоре значительно зависела не только от давления, но и от времени выдержки. Данные приведены для времени выдержки 30 мин. Зона изменения проницаемости качественно совпадает с зоной возрастания трения в зазоре.

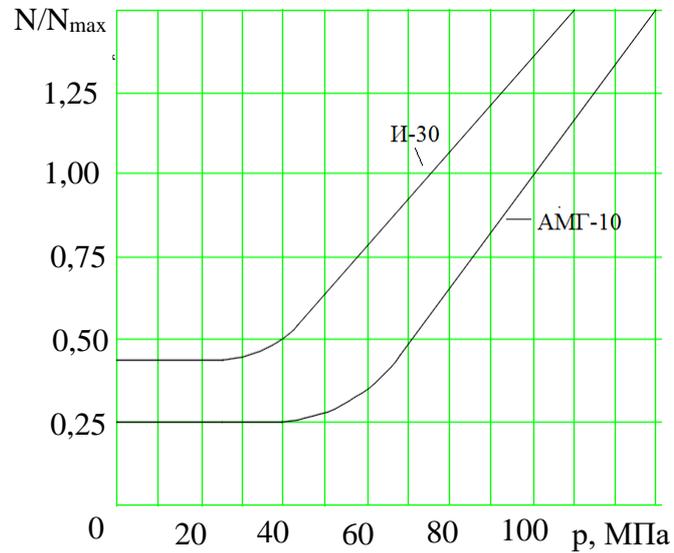


Рисунок 5.17 – Зависимость потребляемой системой мощности от рабочего давления

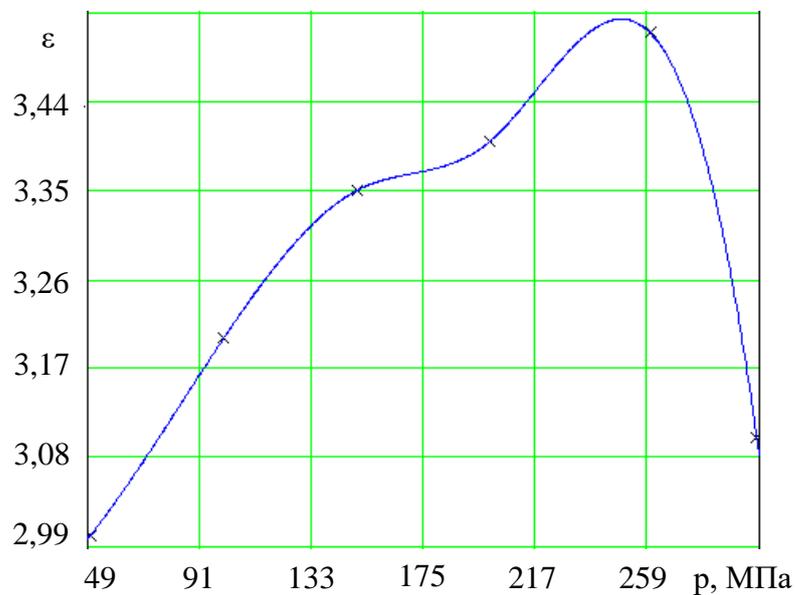


Рисунок 5.18 – Диэлектрическая проницаемость в объеме

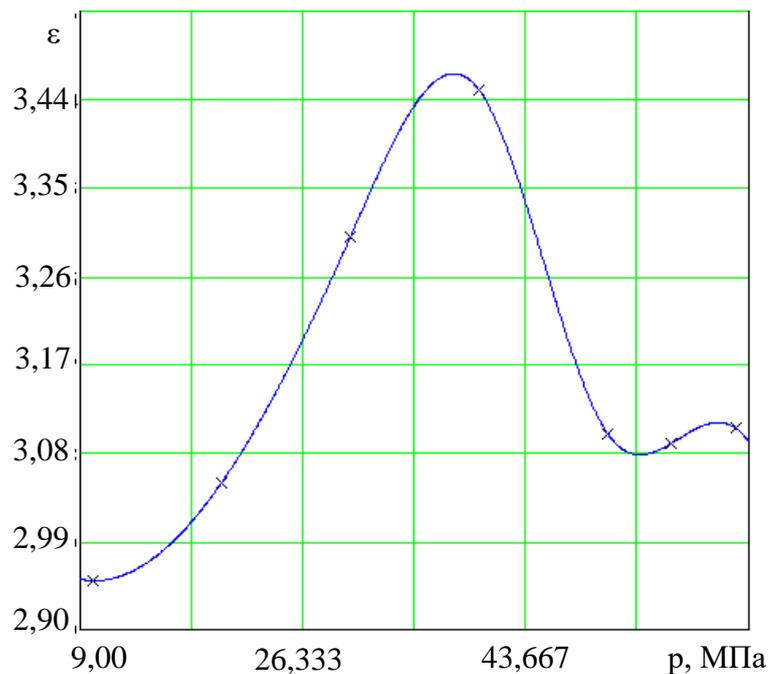


Рисунок 5.19 – Диэлектрическая проницаемость в зазоре 10 мк

5.4 Анализ результатов математического моделирования с использованием модернизированной модели течения жидкости золотниковой пары сервоклапана системы противоизгиба валков прокатного стана

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 мк 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» листопрокатный цех №1 г. Новотроицк. Расчет проводили по модернизированной модели движения жидкости. Результаты расчетов, полученные в программном комплексе Ansis и его приложениях, приведены на рисунках 5.20-5.28.

В качестве иллюстраций расчетов приведены геометрия исследуемой модели, векторы скорости, коэффициент поверхностного трения, статическое давление, молекулярная вязкость, эффективная вязкость, траектории движения.

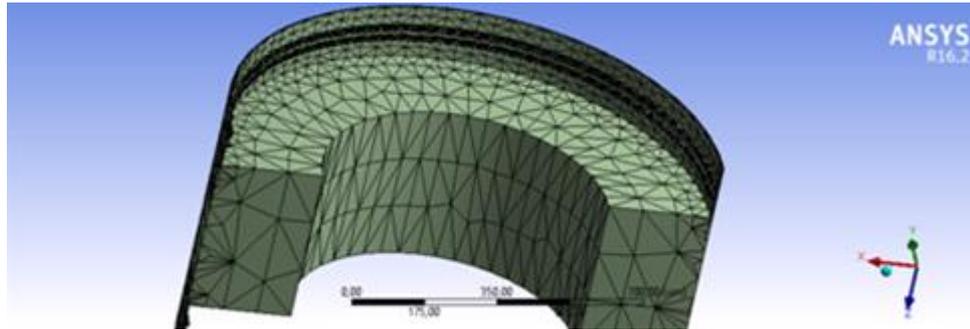


Рисунок 5.20 – Геометрия исследуемой модели

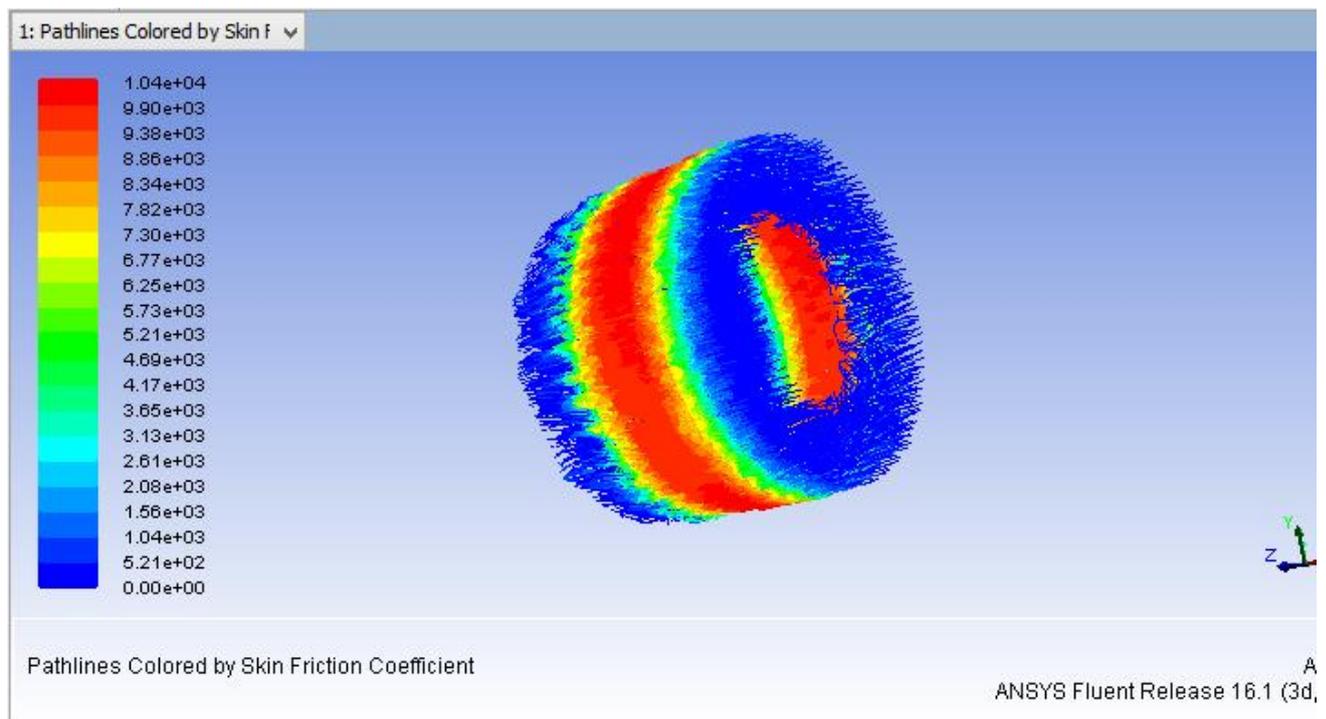


Рисунок 5.21 – Коэффициент поверхностного трения в зазоре

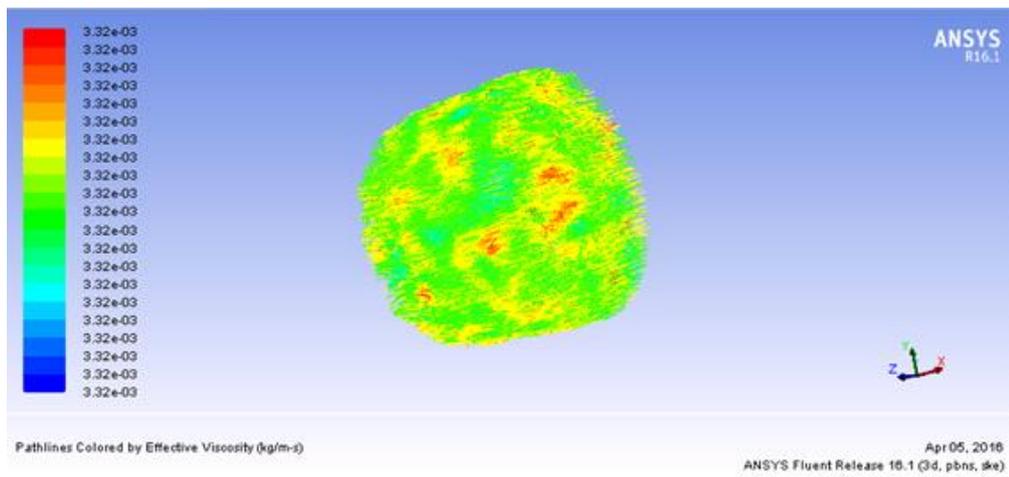


Рисунок 5.24 – Эффективная вязкость в зазоре

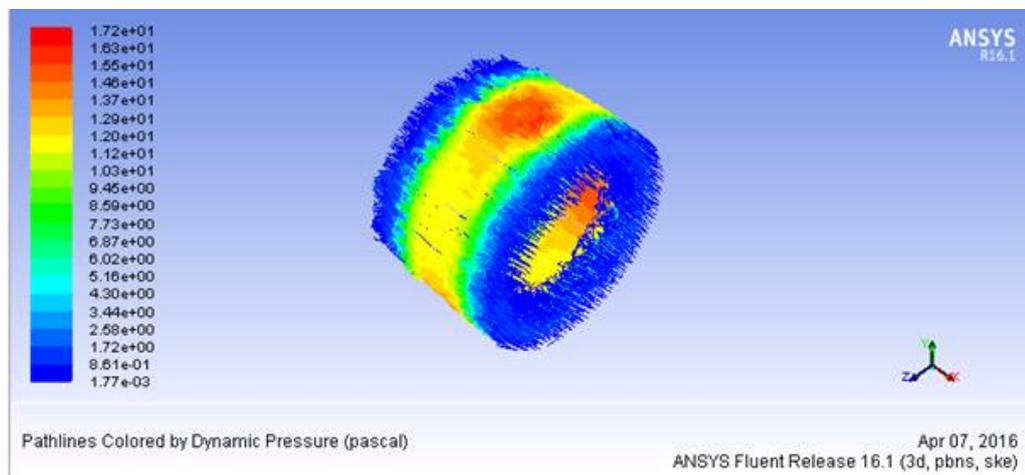


Рисунок 5.25 – Динамическое давление

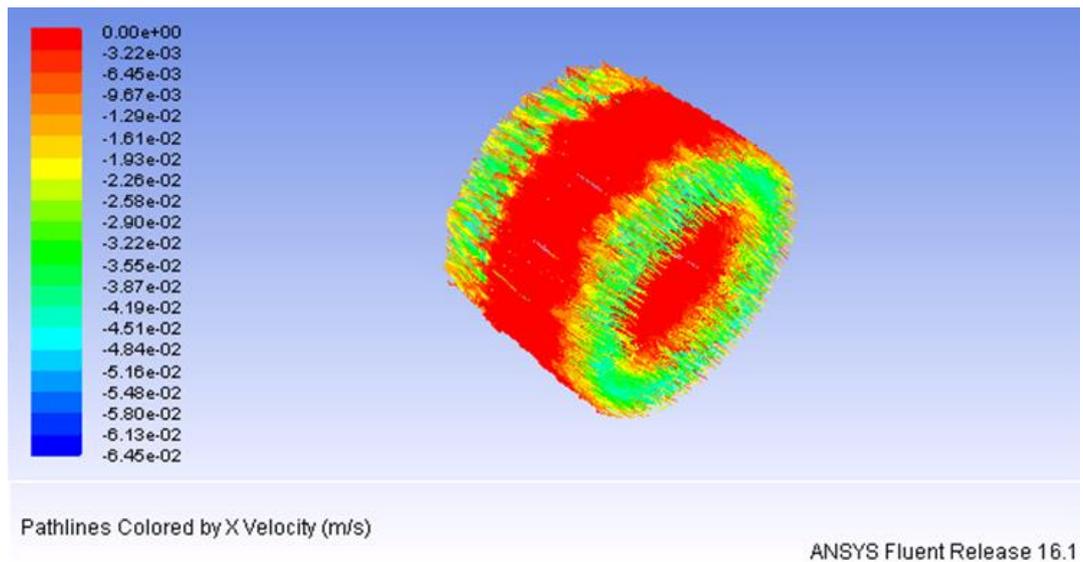


Рисунок 5.26 – Скорость в осевом направлении

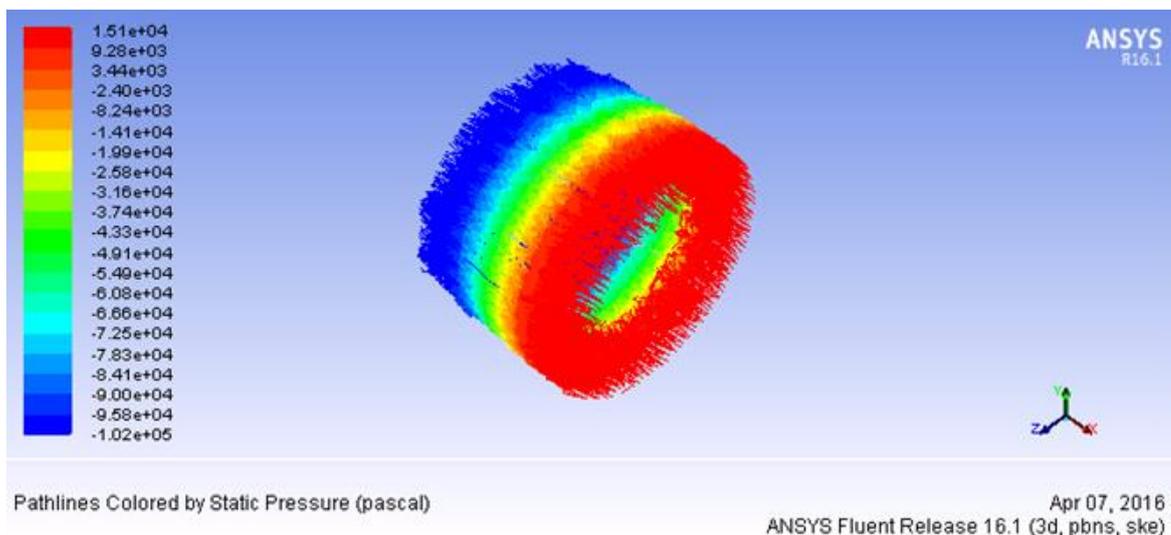


Рисунок 5.27 – Статическое давление

Расхождение результатов, полученных с использованием модернизированной модели движения жидкости, с результатами экспериментов автора, а также с результатами работ [65] не превышает 7% относительно кривых сопротивления, полученных методом наименьших квадратов, что гарантированно находится в диапазоне инструментальной погрешности [271].

В результате проведённых расчётов выявлено возрастание коэффициента поверхностного трения в зазоре (см. рис.5.22) при импульсном повышении давления до 79 МПа, что соответствовало увеличению времени реакции клапана.

В результате проведенных экспериментов как натуральных, так и численных обнаружено, что вязкоупругое поведение жидкостей на базе углеводородов при высоких скоростях сдвига не зависит от наличия в жидкости дисперсной фазы загрязнителя до момента фазовых переходов. Экспериментально полученные данные в целом совпадают с аналитическими зависимостями.

Исследования показывают, что результаты математического моделирования модифицированной моделью позволяют, в отличие от стандартных современных программных комплексов, производить расчет с допустимой для инженерных расчетов точностью в зоне давлений рабочих сред до 200МПа.

5.5 Выводы по главе 3

1. Разработанное диагностическое оборудование и созданная методика съема данных позволяют определять кривые вязкости углеводородов при

различных скоростях сдвига и давлениях до 500 МПа. Подтверждено патентами, актами испытаний и внедрения на металлургических предприятиях и результаты отражены в публикациях [249,272, 261, 262]

Расширена база данных по гидравлическим характеристикам рабочих сред, используемых в системах металлургических агрегатов в диапазоне давлений от 100 до 200 МПа. Результаты отражены в публикациях [166, 223, 251, 253, 254, 255, 257, 258, 259, 260, 263, 265].

2. Выявлено влияние магнитного поля на вязкость растворов углеводородов при наличии в качестве загрязнителя магнетита. Разработанная методика позволяет изучать влияние электромагнитного поля на частицы в растворах жидких сред при высоких давлениях с учетом возникающих эффектов, а также определять влияние размеров частиц исследуемого образца на вязкостные аномалии. Новизна подтверждена патентами и результаты отражены в публикациях [239,269, 238, 257, 264, 266, 267].

3. Разработана методика диагностирования химической стабильности рабочих жидкостей и смазочных материалов путем оценки диэлектрической проницаемости в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления до 200 МПа, позволяющая определять предельные режимы эксплуатации металлургических машин и агрегатов. Разработано оборудование и методики определения характеристик углеводородов в объеме и в зазорах диапазоне давлений 100-500 МПа

4. Разработана математическая модель и решена задача ее применения для диагностирования состояния систем металлургических агрегатов, позволяющая оценивать поведение рабочих сред, смазывающих материалов и теплоносителей при предельных режимах эксплуатации с учетом физико-химических процессов, протекающих в этих средах при давлениях свыше 150 МПа.

Глава 6 Практическое применение результатов разработанных в диссертации научных основ диагностики теплогидравлических систем на металлургических предприятиях

Использование техники позволяет повысить эффективность практически любого производства, не являясь исключением и предприятия металлургического комплекса. Одним из направлений повышения эффективности является своевременный ремонт технологического оборудования, что значительно может снизить расходы на эксплуатацию и предотвратить внезапное возникновение аварийных ситуаций. Оптимизация межремонтных интервалов, позволяет сокращать эксплуатационные расходы весьма существенно и при этом, как правило, повышается коэффициент использования техники за счет сокращения количества аварийных отказов. Учитывая, что наиболее распространенными методиками является планирование ремонтнообслуживания и закупа запасных частей либо на основе нормативов (система планово-предупредительных ремонтов), либо по рекомендациям производителей или по предыдущему опыту эксплуатации оборудования, определение остаточного ресурса на основании достоверных методов диагностики представляется весьма перспективным. Оценка состояния оборудования наиболее часто производится как органолептическим, так и инструментальным методом. Реализация инструментального контроля оборудования требует наличия диагностического оборудования и обученных диагностов, что не всегда возможно на предприятиях с малым и средним объемом выполняемых работ. Специализированные службы на предприятиях часто ориентированы только на свои зоны ответственности. Для повышения эффективности использования диагностического оборудования наиболее целесообразно применять его для анализа оборудования различного назначения. Наиболее эффективным является использование вибродиагностического, тепловизионного оборудования совместно с оборудованием неразрушающего контроля, системами диагностики гидравлического, механического оборудования по характеру электрического

силового или управляющего сигнала и системами анализа состояния рабочих жидкостей и смазок. Использование комбинированных методов диагностики резко повышает результативность диагностических мероприятий, что доказал опыт автора на предприятиях: Первоуральский Новотрубный завод, Норильск Никель, ГАЗ, УГМК, Уральская Сталь.

Одним из универсальных методов диагностики, в частности, гидравлического оборудования является анализ температурных полей с использованием тепловизора совместно с моделированием температурные полей (подробно метод изложен в главе 2). Необходимо заметить, что диагностика гидравлического и механического оборудования и систем управления на основе анализа температурных полей не нова, известны работы, посвященные комплексной диагностике [227].

6.1 Комплексная диагностика гидравлического пресса высадки концов труб производства SMS Meer

Мероприятия по оценке состояния пресса высадки и вспомогательного оборудования 4-го цеха ОАО «ПНТЗ» производились в соответствии с предложенной схемой проведения первичной диагностики (см. глава 2 рисунок.2.2).

Диагностируемый пресс высадки представлял собой гидромеханическую систему, с цифровой системой управления (рисунок 6.1) . При анализе данных контроллера управления гидравлической системой выявлен сигнал периодически возникающей, так называемой «плавающей» неисправности, что приводило к остановке оборудования и простоям цеха. При проведении диагностирования выявлялась причина возникновения неисправности. Кроме того, была проведена оценка остаточного ресурса ключевых гидравлических компонентов. Процедура диагностирования проводилась в два этапа. На этапе первичной оценки состояния применялся тепловизор совместно с разработанной системой виброакустического контроля и системой контроля токового сигнала. На этапе углублённого

диагностирования применялись методика математического моделирования элементов оборудования и система оценки состояния рабочих жидкостей .

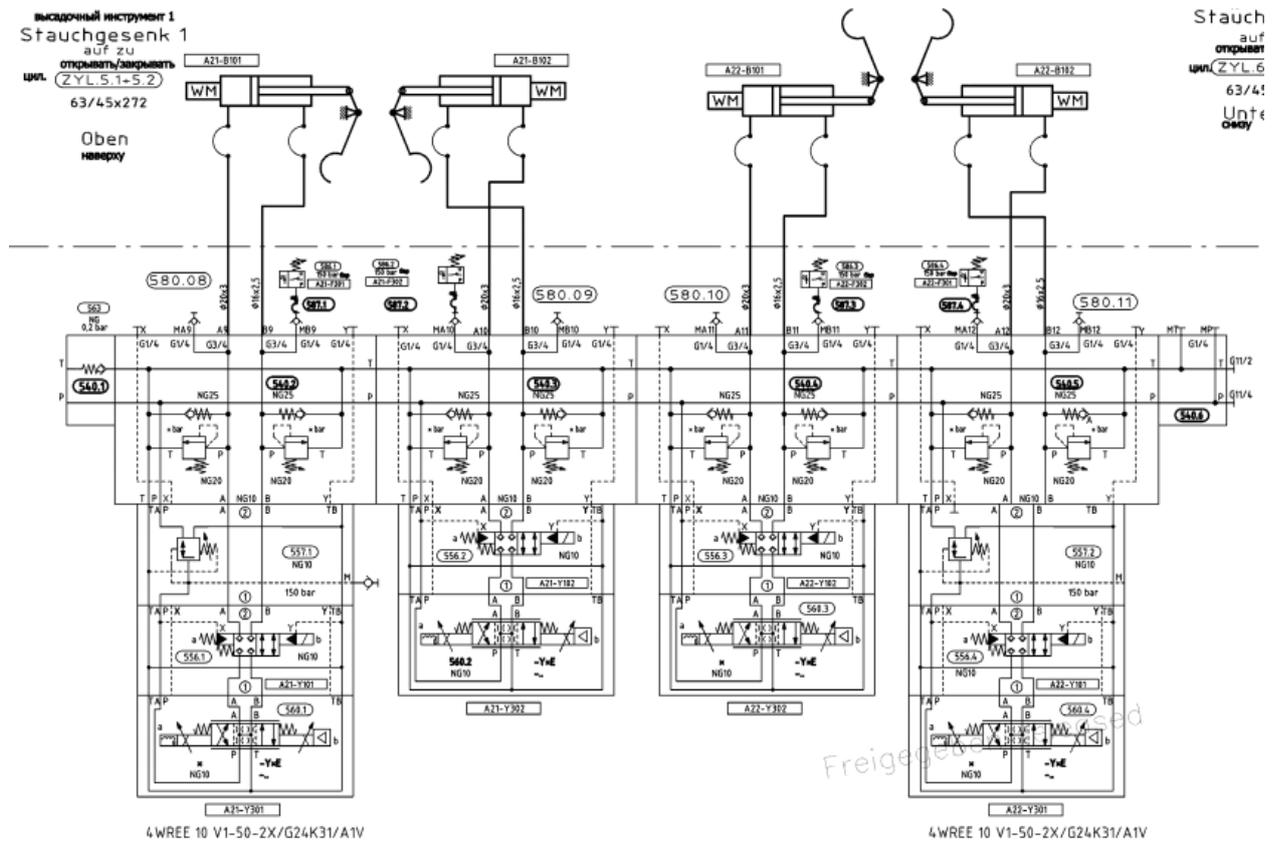
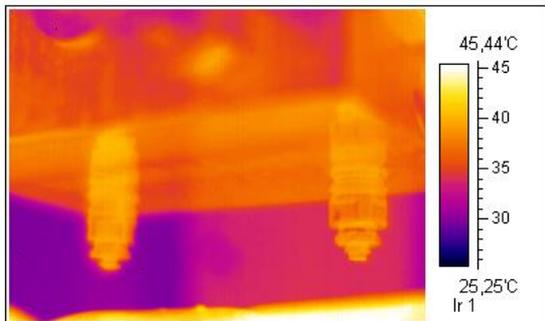


Рисунок 6.1 – Гидравлическая схема пресса высадки.

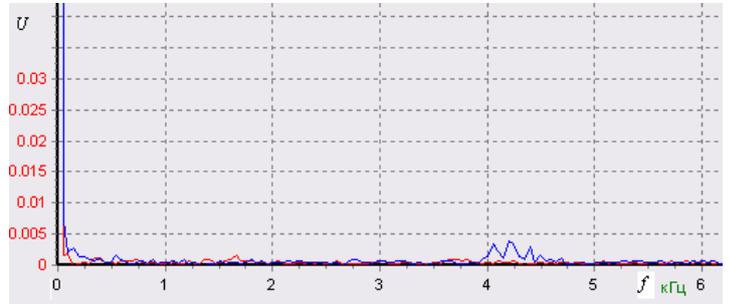
При проведении первичной диагностики проводился хронометраж времени и анализ затрат на проведение диагностических процедур.

Так в ходе первичного диагностирования гидравлических цилиндров по внешним тепловым полям выявлен дефект настройки клапанов (рисунок 6.2). Первичный анализ состояния гидроцилиндров и вспомогательной аппаратуры по внешним температурным полям возможен, но целесообразна перекрестная проверка акустическим методом или на стенде. Совместное использование методов анализа внешних тепловых полей гидроцилиндра и акустического сигнала не только увеличило вероятность выявления дефекта. Этот метод позволил в динамике оценить как наличие утечек, так и степень износа направляющих колец при оценке состояния объекта. На рисунке 6.3 представлены температурные поля гидравлического цилиндра, причем за зоной повреждения в

виде удара виден горизонтальный тепловой след, что характерно для повреждения уплотнений поршня (контрольное вскрытие подтвердило предположение).



А



б

Рисунок 6.2 –а. Температурные поля клапана защиты от инерционной нагрузки: левый, имеющий более высокую температуру, промыт; б. Подтверждающий виброакустический сигнал с характерными пиками, характерными для локальной кавитации в зоне утечки

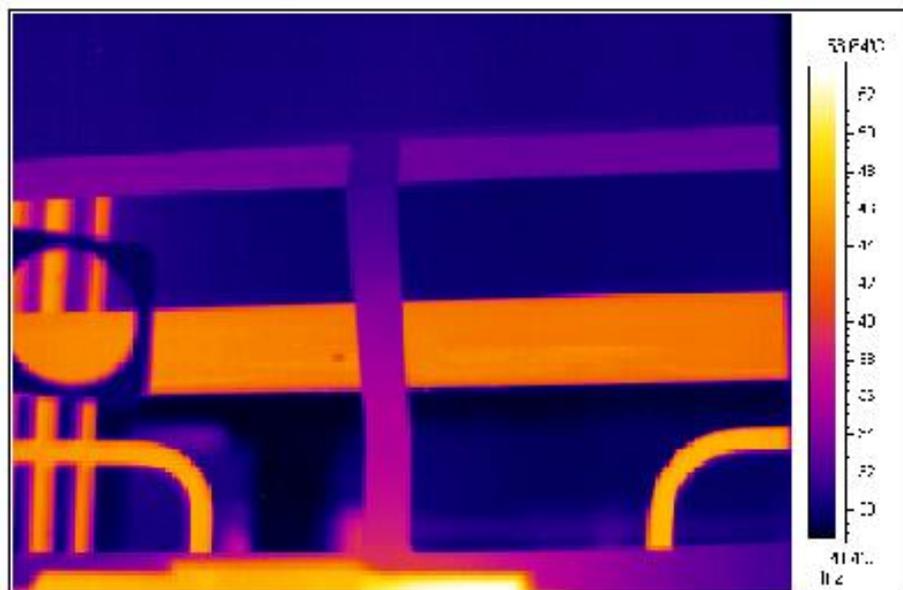


Рисунок 6.3 – Температурные поля гидроцилиндра

При проведении замеров была зафиксировано зависимость частоты кванционных колебаний при утечках в гидрооборудовании от температуры. С ростом температуры зафиксировано увеличение частоты пика кванционных

колебаний с одновременным расширением диапазона кванционных колебаний (рисунок 6.4).

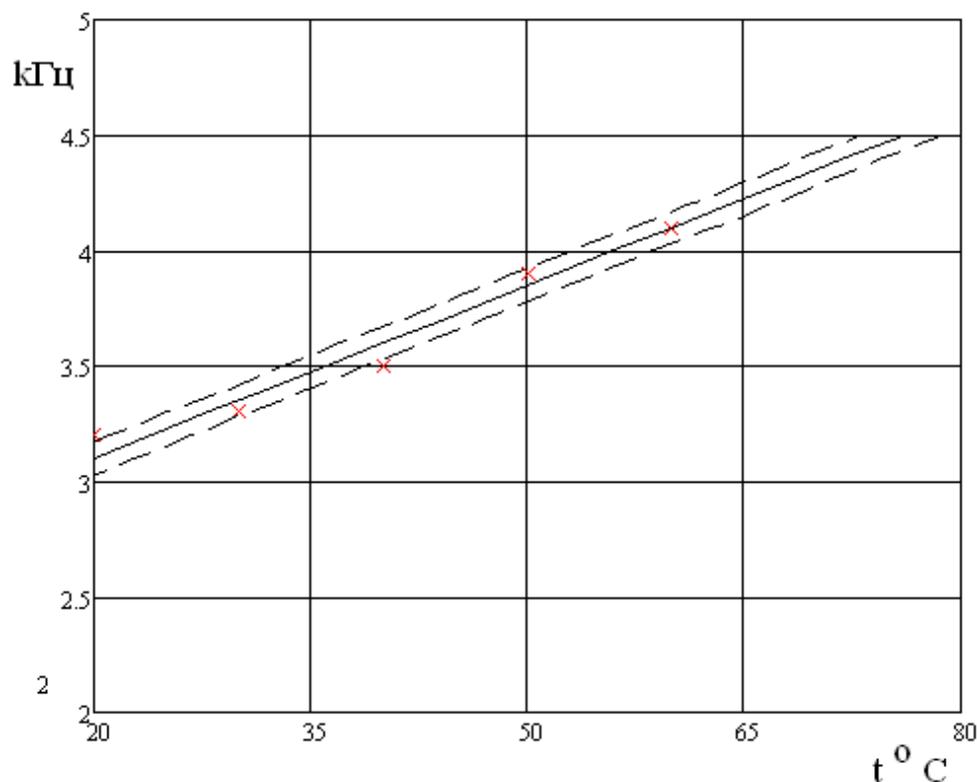


Рисунок 6.4 –Зависимость средней частоты кванционных колебаний в зоне утечки от температуры рабочей жидкости. Внутри зоны ограниченной пунктиром находится 68,2% выборки

Попытки оценить степень износа объемных насосов предпринимались еще в начале восьмидесятых [227], но только использование тепловизоров позволило упростить процесс диагностики и сделать его более объективным (рисунок 6.5).

Анализ температурных полей группы насосов (рисунок 6.6) показал повышенную температуру насоса №1 и повышенную среднюю температуру обмоток двигателя (по сравнению с насосами №2 и 3), не превышающую допустимую (рекомендация по возможности для выравнивания ресурса использовать насос №1 в качестве резервного). Температурное поле насоса № 1 свидетельствует о значительной потере ресурса, дальнейшее наблюдение показало его отказ спустя 2100 часов. Одновременно с оценкой вероятности отказов по анализу температурные поля проводили анализ изменения состояния

рабочих жидкостей, вибросигнала, пульсаций давления и для некоторых насосов величины расхода. Условия эксплуатации групп насосов отличались по уровню загрязненности рабочих жидкостей, исследовали насосы, работающие на 12-ом и 8-ом классах чистоты по NAS [273]. Практически все насосы серии A10VSO, работавшие на жидкости класса чистоты 8 по NAS, отказали при наработке 17056-18300 часов, причем характер разрушения у всей серии один – разрушение передней опоры качения.

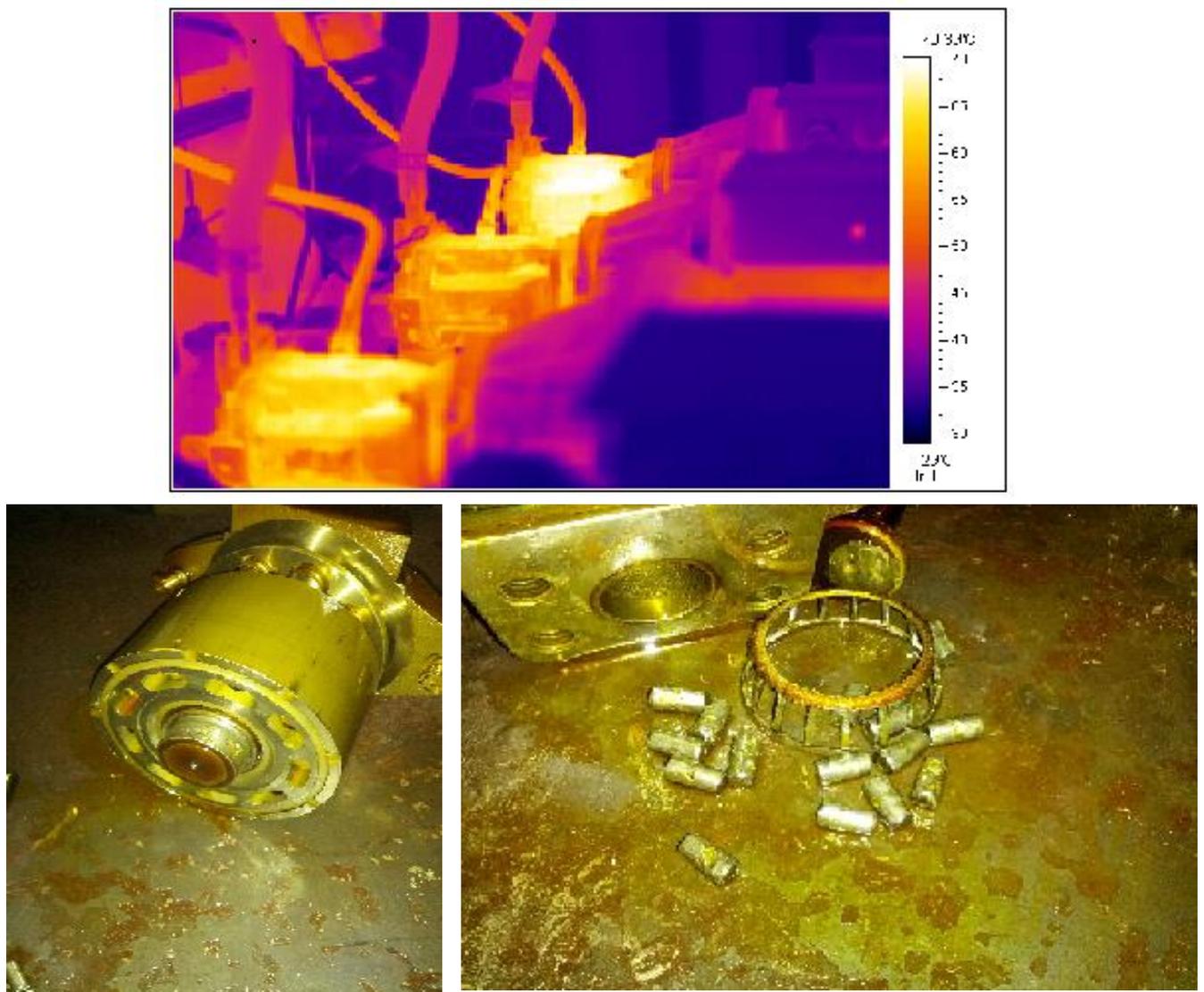


Рисунок 6.5 – Температурные поля группы насосов и результаты вскрытия через 2100 часов наработки

Наибольшую достоверность прогнозов дали методы анализа вибросигнала и пульсаций давления (время предсказания отказа не менее 2000 часов).

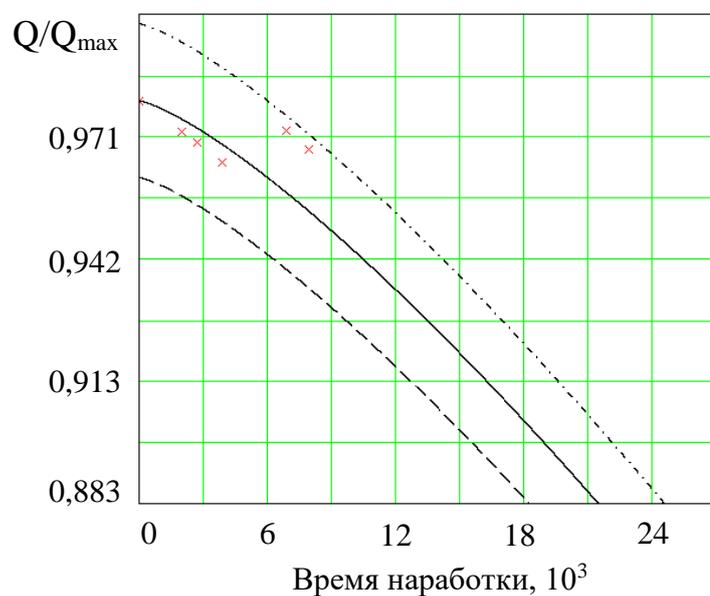


Рисунок 6.6 – Расчет вероятного времени отказа насоса по результатам падения расхода

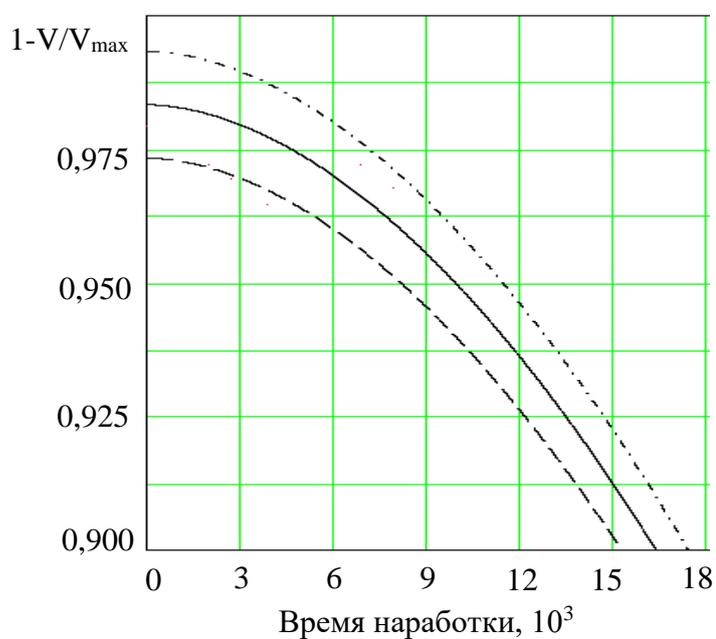


Рисунок 6.7 – Расчет времени отказа насоса по результатам замеров виброскорости

Наихудший прогноз был получен по результатам анализа проб масла (время предсказания отказа 20 дней). Иная ситуация наблюдалась при анализе отказов насосов, работавших на среде с 12-ым классом чистоты по NAS. В этой группе насосов наработка на отказ не превышала 10 тыс. часов, наилучшие результаты по остаточному предсказанию ресурса получены тепловизионным методом контроля и при анализе утечек (время надежного предсказания отказа не менее 1500 часов). Оценка остаточного ресурса агрегата насосов A4VSO рабочим объёмом 250 см³ производилась по зависимости вида: $x(t) = vt^\alpha + \Delta x_{ct} + \Delta x_n$, коэффициенты регрессии приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Класс чистоты жидкости (NAS)	V	A	Δx_{ct}
9	0.1	1.32	0.93
10	0.07	1.51	0.9
11	0.03	1.86	0.61
12	0.04	2.34	0.45

Методами комплексной диагностики оценивалось состояние объёмных и центробежных насосов вспомогательного оборудования. Использование метода первичной диагностики с использованием термограмм позволило выявить дефект насоса марки *HPR 160D* (рисунок. 6.9)

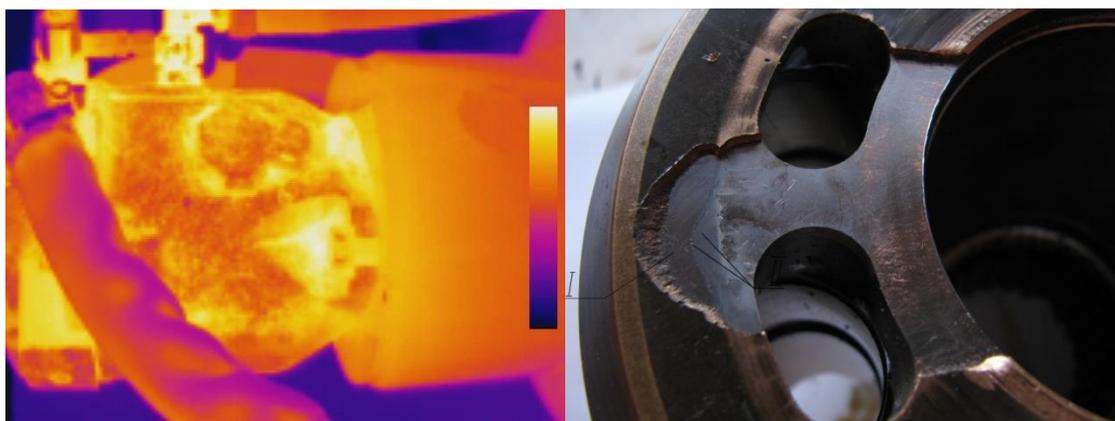


Рисунок 6.9 Термограмма и отслоившееся антифрикционное покрытие

Использование подхода, при котором на каждом временном шаге при использовании нескольких методов диагностики и расчёт наиболее вероятного

времени отказа по худшему прогнозу диагностируемому параметру даёт наиболее надёжный прогноз состояния оборудования.

Опыт применения диагностирующих систем состояния гидравлических элементов машин показал, что использование только одного метода диагностики часто приводит к значительными дорогостоящим диагностическим ошибкам и поэтому целесообразно применение комплекса мероприятий, включающего акустическую, вибрационную диагностику, анализ масел и токовых сигналов. Кроме того использование одного параметра диагностирования давало до 9% ошибок оценки причин отказов.

Так экспресс-анализ состояния гидромоторов привода подачи заготовок высадочного основан на контроле расхода утечек через линии дренажа. Увеличение утечек свидетельствует о падении объемного КПД и, следовательно, о наличии износа (рисунок 6.10).

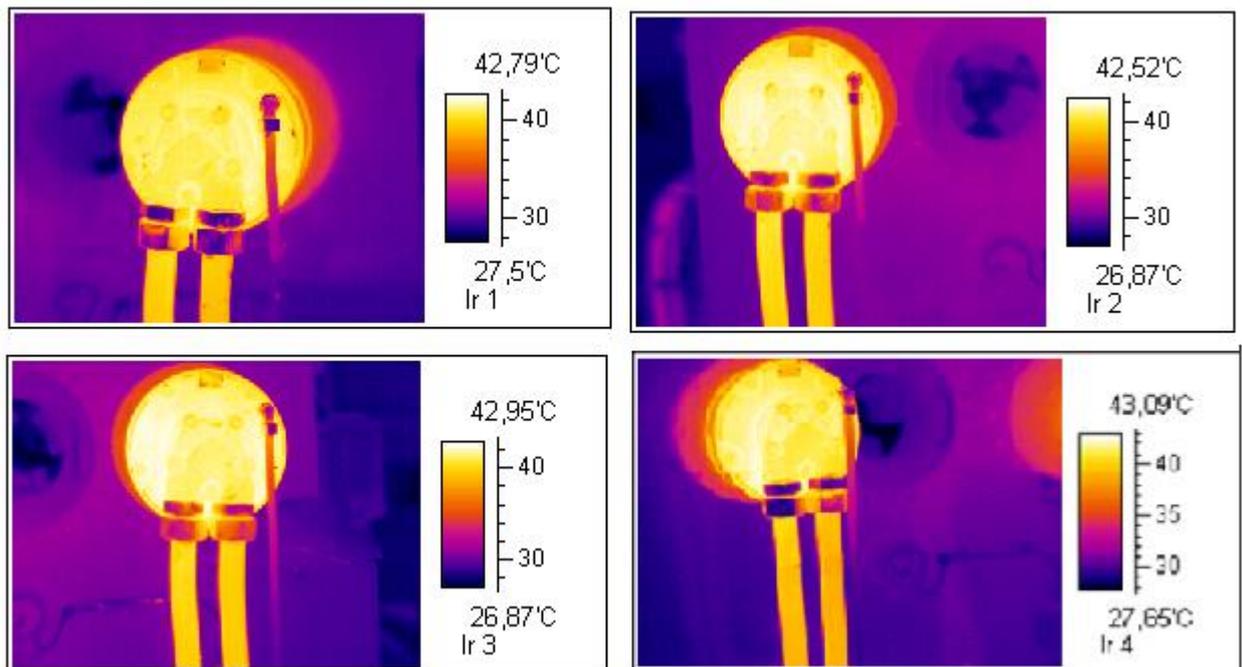


Рисунок 6.10 – Температурные поля гидромоторов

Косвенно о величине износа можно судить по температуре дренажных каналов. Но использование только тепловизионного метода позволяет фиксировать износ не только методом сравнения. Зная температуру окружающего воздуха, интенсивность свободной конвекции и материал, можно расчётным

путём определить температуру среды в объекте, а поэтому сделать вывод о локализации износа объекта. Эти методы эффективны при анализе износа опор скольжения, золотниковых пар.

Метод комбинированной диагностики с использованием метода термограмм и метода анализа вибрационного сигнала позволил выявлять клапанные элементы подвергшиеся абразивному износу (см. рис. 6.11).

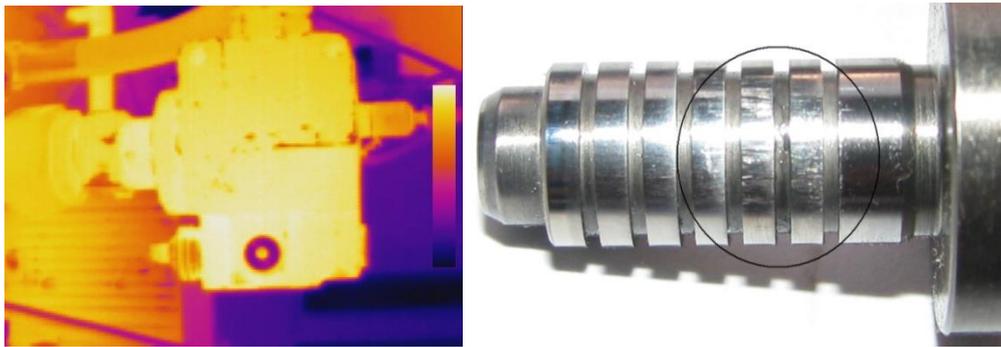


Рисунок 6.11 Термограмма и клапан, зона абразивного износа выделена

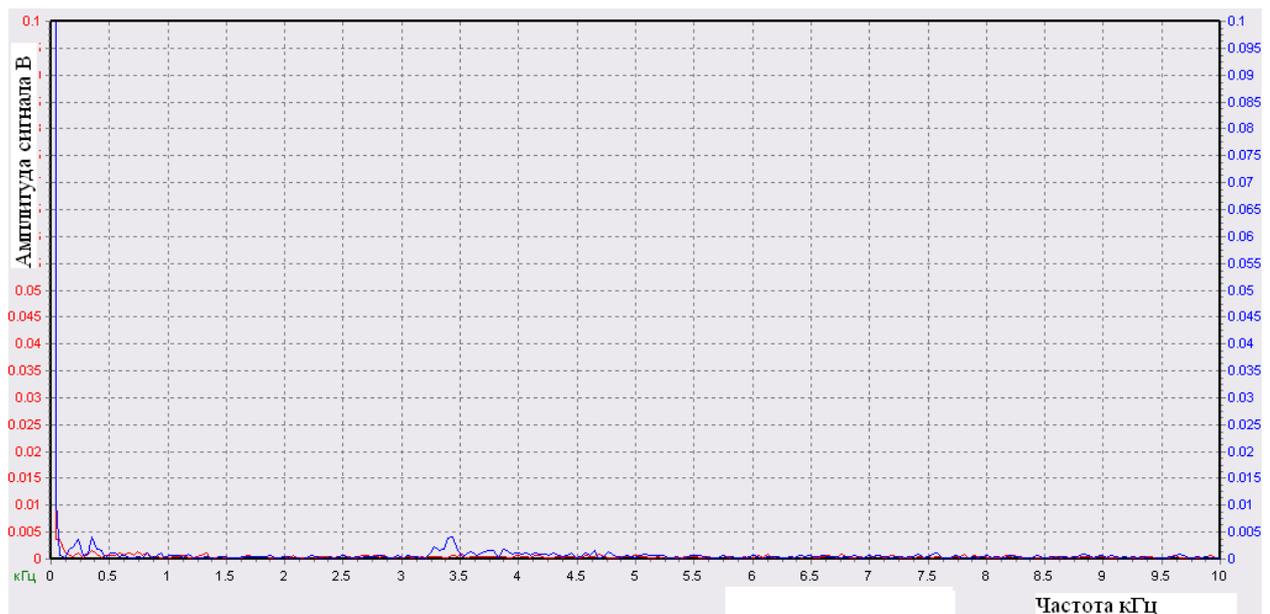


Рисунок 6.12 Вибрационный сигнал

Надежным признаком утечки является возникновение кавитации, вызывающей характерные пики в диапазоне частот от 3кГц и выше в зависимости от температуры жидкости.

Анализ состояния центробежных насосов системы охлаждения прессы высадки также проводился с использованием тепловизионного оборудования, но

анализ спектра вибрационного или акустического сигнала (рисунок 6.9) даёт более надёжный прогноз. Вероятность верного выявления дефектов центробежных насосов тепловизионным методом -0.63, вероятность верного выявления дефектов комбинированной методом составила 0.87.

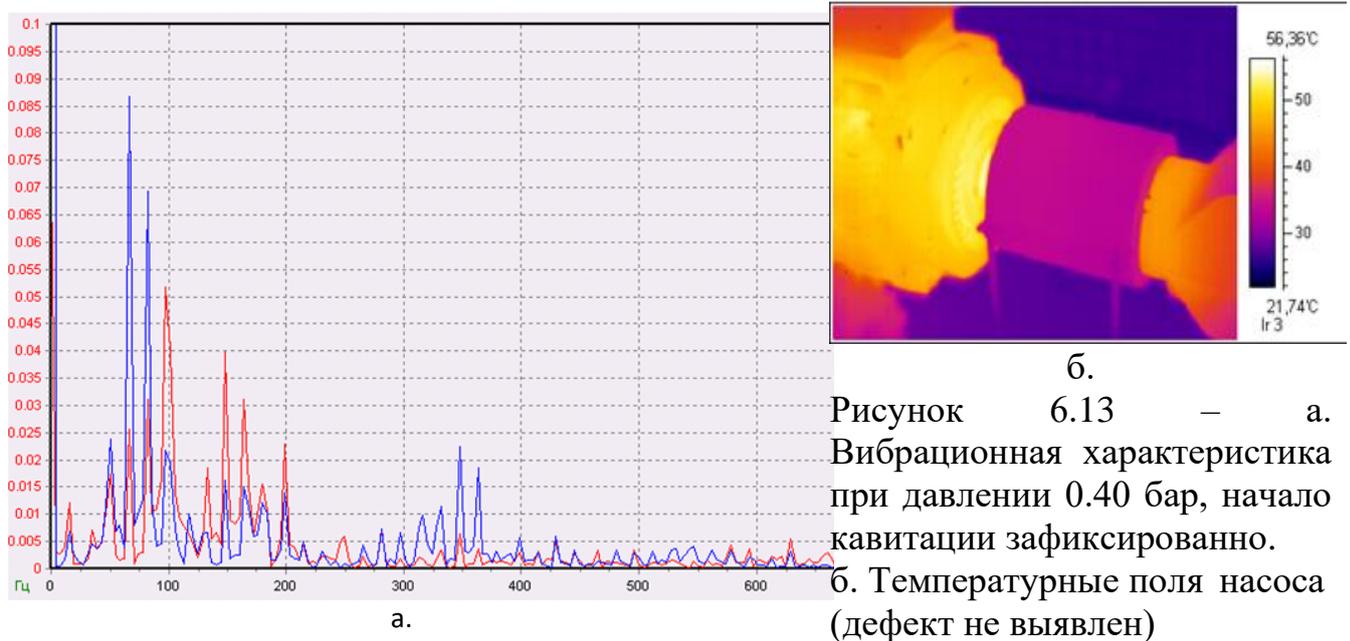


Рисунок 6.13 – а. Вибрационная характеристика при давлении 0.40 бар, начало кавитации зафиксировано. б. Температурные поля насоса (дефект не выявлен)

В ряде случаев использование только методов первичной комбинированной диагностики при анализе теплогидравлического оборудования высадочного пресса оказывалось недостаточно. Так причина отказа дросселирующего распределителя сопровождался локальным ростом утечек в паре гильза - золотник, сопровождавшийся локальным изменением температур и частичной потерей подвижности была установлена с использованием методик оценки состояния рабочих жидкостей. Проведённое исследование диэлектрической проницаемости образцов рабочей среды в условиях сходных с условиями нагружения гидравлической системы высадочного пресса показало наличие полимеризации (рисунок 5.18). Причиной данного дефекта явилась химическая реакция пакета присадок (рисунок 6.14) при смешиваний масел различных производителей. Стоимость проведённого анализа рабочей жидкости с помощью установки контроля диэлектрической проницаемости в 13.75 раз ниже стоимости анализа на спектроанализаторе ОАО «ПНТЗ». Анализ эффективности

использования как отдельных методов диагностики, так и комплекса диагностических мероприятий приведена в разделе 2.3 главы 2.

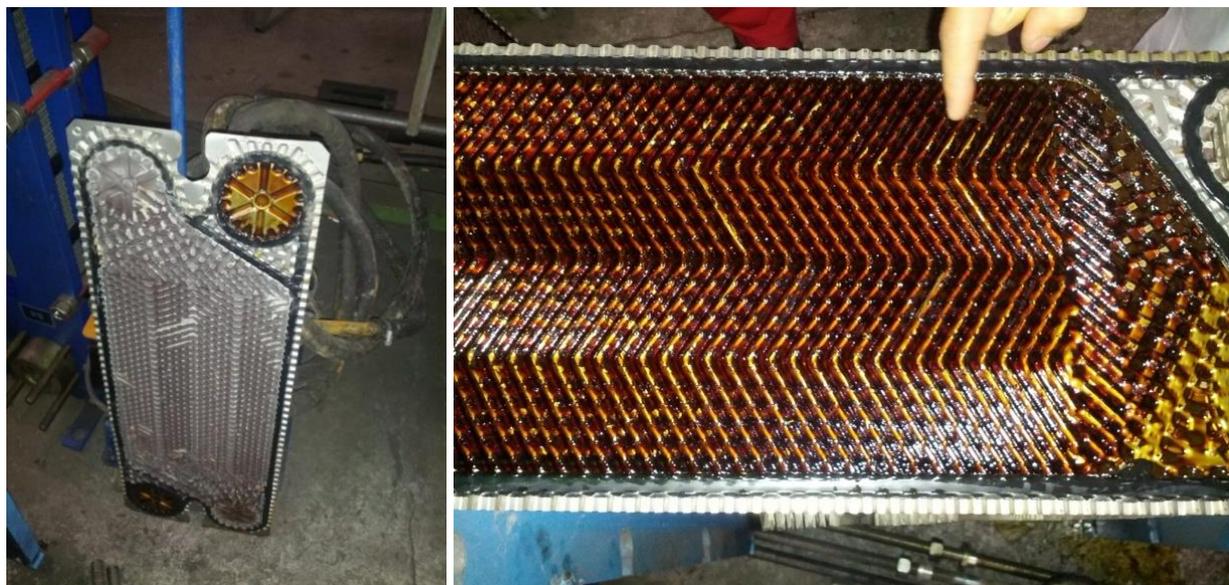


Рисунок 6.14 – Выпадение присадок

6.2 Оценка состояния оборудования прокатного стана 2800

В апреле 2018 года было проведено комплексное обследование оборудования листопрокатного цеха №1 АО «Уральская Сталь», в ходе обследования по результатам первичной диагностики с использованием тепловизионного оборудования был выявлен ряд узлов основного оборудования, подвергнутого затем углублённой диагностике.

Исследовались привода рольгангов, силовые гидравлические привода и их элементы, опоры валков, система противоизгиба валков.

На рисунке 6.15 представлены температурные поля высоконагруженной опоры скольжения прокатного стана при стабилизации режима смазки. Клапаны защиты от инерционной нагрузки при штатной работе механизма закрыты, локальное изменение температурные полей, как правило, свидетельствует о наличии утечки (рисунок 6.16,6.17).

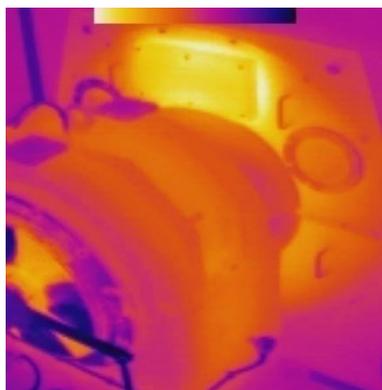


Рисунок 6.15 – Температурные поля опоры валка прокатного стана



Рисунок 6.16 – Температурные поля насоса промывки, утечка по клапану управления

На рис 6.15,6.16 представлены типичные термограммы оборудования, находящегося в стадии параметрического отказа.



а)

б)

с)

Рисунок 6.17 – Термограммы характерных параметрических отказов гидравлического оборудования стана; а) неисправность обратного клапана плунжерного насоса; б) «подклинивание» золотника; с) внутренняя утечка по гидрозамку силового привода.

При проведении комплексного обследования оборудования листопрокатного цеха №1 АО «Уральская Сталь» была решена задача безразборной оценки состояния электрогидравлических распределителей с использованием токового и тепловизионного метода контроля (рисунок 6.18) и расчётного метода, оценки остаточного ресурса приводов рольгангов, задача оценки состояния системы противоизгиба валков стана 2800 ЛПЦ № 1 от параметров состояния рабочей среды в зазоре пары гильза - зольник сервоклапана управления противоизгибом.

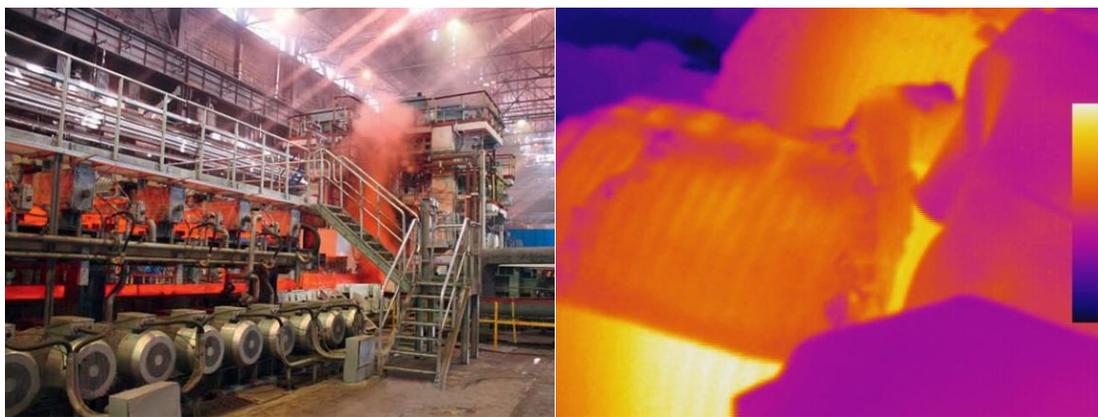


Рисунок 6.18 Привода рольгангов ЛПЦ №1 АО «Уральская Сталь» и термограммы оценки состояния приводов рольгангов при наличии дефекта.

Для оценки состояния электрогидравлических распределителей применена методика контроля токового сигнала для оценки состояния плунжерных пар по оценке усилия перемещения (рисунок 6.19).

Так как усилие на электромагните электрогидравлических распределителей нелинейно возрастает при перемещении сердечника, а токовая нагрузка также меняется при изменении усилия на сердечнике, то контролируя токовый сигнал, можно судить о процессах, протекающих в паре гильза–золотник распределителей.

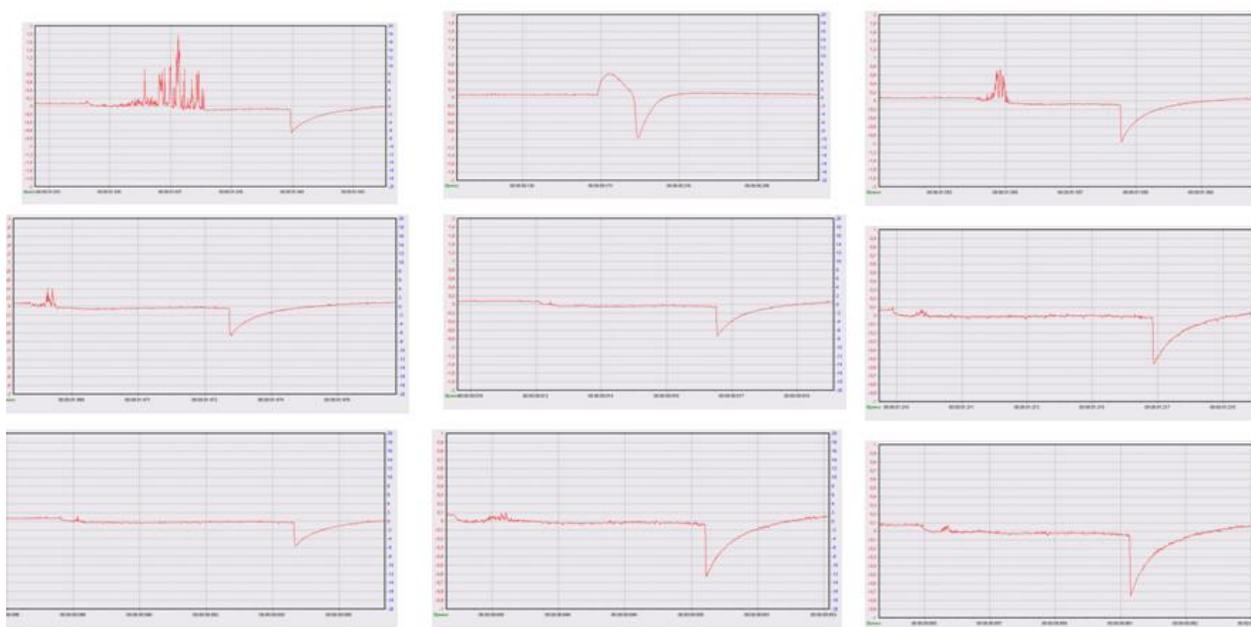


Рисунок 6.19 – Виды записи токового сигнала

при различном состоянии золотниковой пары

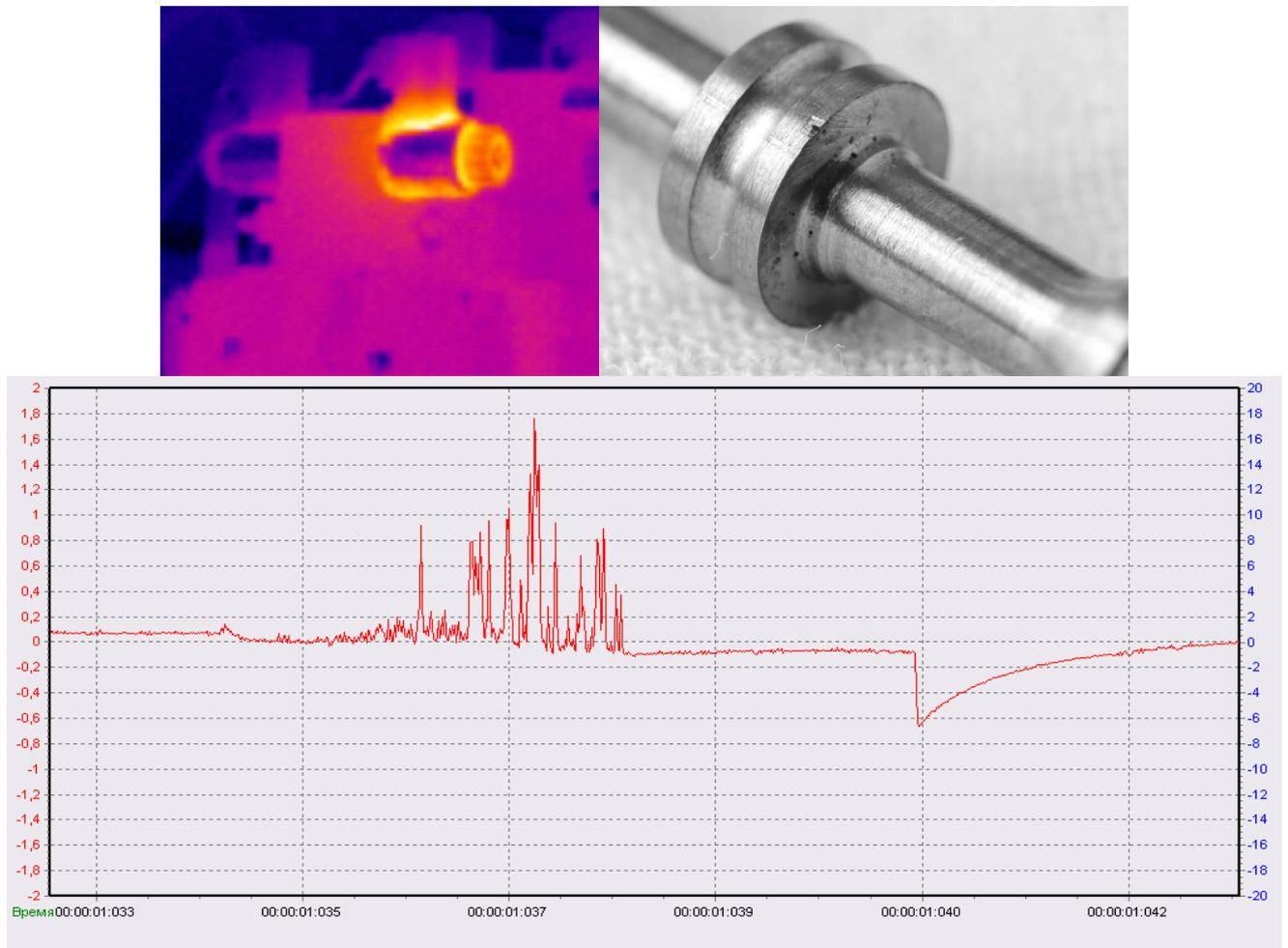


Рисунок 6.20 – Термограмма, токовый сигнал и результат вскрытия с распределителя при интенсивном абразивном износе

Методика и оборудование, используемое для оценки состояния золотниковых пар [275-277], описаны в разделе главы 4 и применялись автором для контроля состояния жидкости в зазорах плунжерных пар.

Необходимо отметить, что непрерывный контроль токового сигнала на контрольном распределителе позволяет косвенно отслеживать состояние рабочей жидкости в системе, выявляя время изменения ее состояния, что крайне важно для поиска причин попадания загрязнителя.

Предложенный метод оценки состояния рабочих жидкостей позволил установить наличие ограничений по предельному быстродействию распределителей управления противоизгиба валков стана, связанных с состоянием системы рабочая среда- гильза - золотник. Значительная доля этих ограничений возникает вследствие физико-химических процессов, протекающих в зазорах плунжерных пар и приводящих к «склеиванию» последних. Отказы, вызываемые этими процессами, устраняются, как правило, узловой заменой, что ведет к значительным издержкам. Одной из причин резкого изменения состояния жидкости в зазоре является наличие частиц загрязнителей. Нерастворимые частицы загрязнителя, находящиеся в рабочей жидкости гидравлических систем, отличаются как по своему составу, так и по размерам, поэтому различается степень их влияния на работоспособность гидравлического оборудования. Данные частицы являются своеобразными центрами образования полимерных структур, резко увеличивая зону физико-химических превращений [278]. Естественно, различиями состава и размера обладают и временные полимерные структуры, возникающие в зазорах прецизионных пар трения, следовательно, и их влияние на рабочие характеристики гидравлической системы также различно. Подобные временные полимерные структуры могут образовываться в результате полимеризации или поликонденсации [279]. Кроме того, даже неполярные молекулы углеводов способны образовывать граничные зоны за счет взаимодействия изомеров [280]. Причем установлено, что процессы поликонденсации и полимеризации могут протекать обратимо или необратимо в зависимости от условий реакции и природы мономеров. Обратимость процесса поликонденсации прежде всего обусловлена образованием побочных низкомолекулярных продуктов реакции: воды, аммиака, спирта, хлористого водорода и т.д., но при процессе обратимой полимеризации побочные продукты не образуются [146]. Наибольший интерес в практическом плане представляют ферромагнитные загрязнения, являющиеся, как правило, продуктами коррозии и износа. Увеличение концентрации данных частиц в зазоре даже при условии прохождения их через фильтроэлементы, задерживающие частицы размером

большим $1/3$ зазора, как показали натурные эксперименты, связано (см. главу 4) в том числе и с намагничиваемостью плунжерных пар при работе. Оказывают свое влияние и присадки, содержащиеся в масле. Многокомпонентные гидравлические масла включают в себя различные углеводородные соединения, обладающие разной молекулярной массой. Их низкомолекулярная часть выступает в роли жидкого носителя и своеобразной смазки для высокомолекулярных соединений, размеры которых зачастую не намного меньше или даже равны размерам зазоров между прецизионными парами трения. Попадание подобных высокомолекулярных частиц совместно с потоком низкомолекулярных соединений в зазоры, например, золотниковых пар и последующее вытеснение из зазора низкомолекулярных соединений под действием сдвиговых напряжений, образующихся при перемещениях золотника, сопровождается дальнейшим накоплением в зазоре высокомолекулярных соединений, размеры которых близки к размерам самого рабочего зазора золотниковой пары. При накоплении данных высокомолекулярных соединений в рабочем зазоре возможно в случае резкого скачка давления образование из них временных или даже постоянных полимерных структур, что приведет к залипанию или заклиниванию золотниковой пары. Данный эффект был выявлен и смоделирован (см. 5.4, рисунок 5.14) при диагностике второй ступени сервоклапана системы противоизгиба валков прокатного стана АО «Уральская Сталь».

Одним из простых и дешевых способов снижения вероятности «склеивания» плунжерных пар при функционировании золотниковых систем является периодическое размагничивание последних.

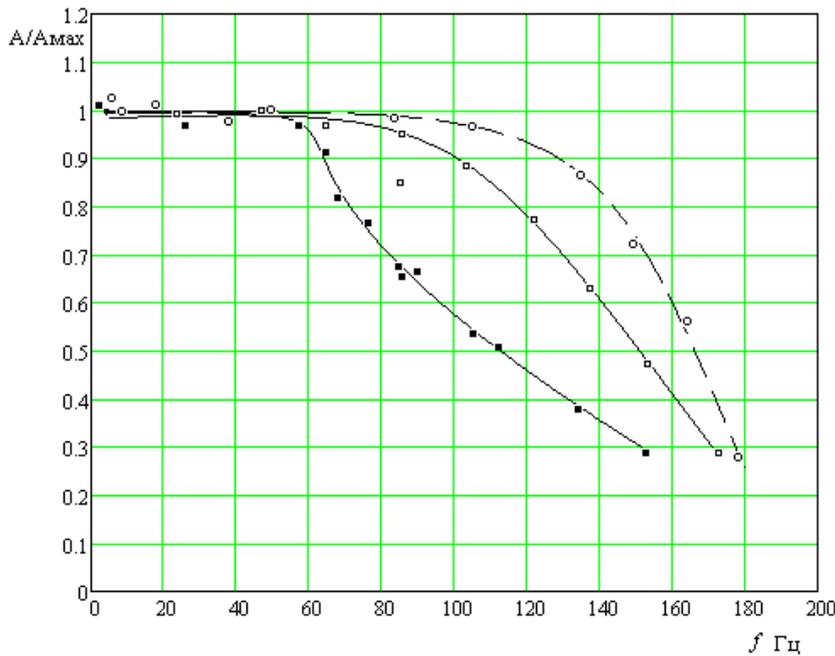


Рисунок 6.21 – Диаграмма Бодэ сервклапана, иллюстрирующая потерю быстродействия клапана. \circ – давление 25 МПа; \square – давление 35 МПа; \blacksquare – давление 45 МПа.

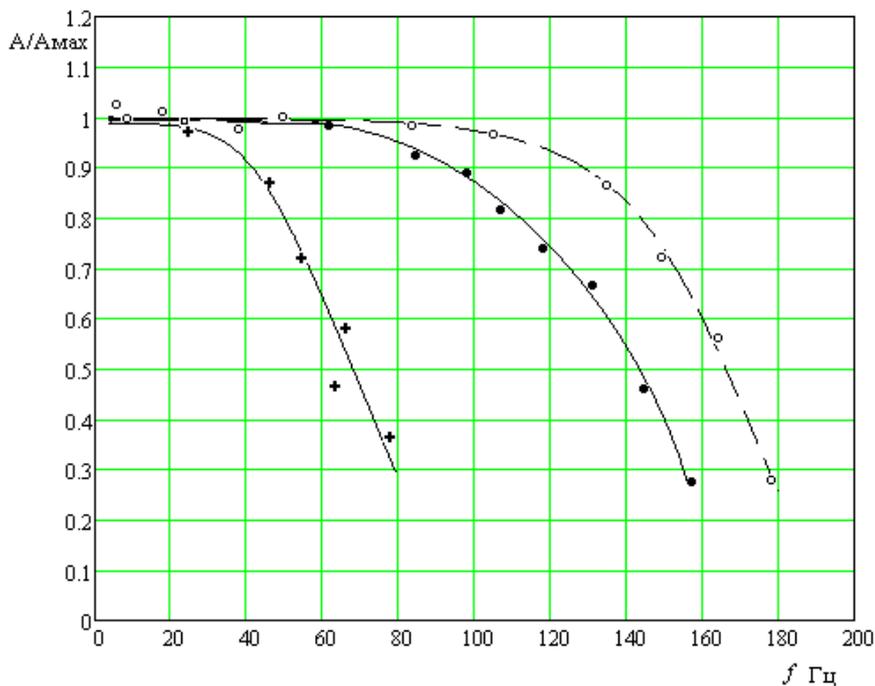


Рисунок 6.22 – Потеря быстродействия клапана. Превышение температуры корпуса: \circ – 5°C; \bullet – 26°C; $+$ – 42°C.

Увеличение температуры корпуса, как следствие, возникновение внутренних перетечек при износе пары гильза – золотник косвенно свидетельствует о падении скорости реакции системы. Возрастающая температура

на 42 °С приводит к возрастанию утечек с 18 см³/мин до 74 см³/мин и падению быстродействия в 2.6 раза (рисунок 6.22). Зависимость падения критической частоты клапана при изменении температуры корпуса при известной критической частоте привода позволяет оценить параметры необходимые для сохранения работоспособности системы.

6.3 Оценка технического состояния оборудования ванн горячего цинкования

При проведении работ по оценке технического состояния и модернизации оборудования ванн горячего цинкования реализован анализ состояния футеровки, защитных экранов, газоходов, погружных тупиковых горелок.

Первичный анализ состояния защитной футеровки осуществлён методом контроля внешних тепловых полей (рисунок 2.7), расчёт остаточной толщины теплоизоляции решался, как по упрощённой методике, приведённый в главе 2 раздел 2.2 так и методом моделирования в прикладных программных пакетах.

При анализе состояния газоходов выявлен ряд причин повышенного сопротивления тракта овода дымовых газов. Было проведено моделирование движения газов в канале с использованием предложенных методик, при этом использовались данные термограмм как граничные условия. Анализ результатов математического моделирования (рисунок 6.23) и тепловизионной съёмки показывает наличие значительного сопротивления движению газов в каналах за фильтрационной установкой. Значительным сопротивлением обладает сходящийся участок непосредственно за фильтром, зона поворота потока вниз, зона схождения потоков.

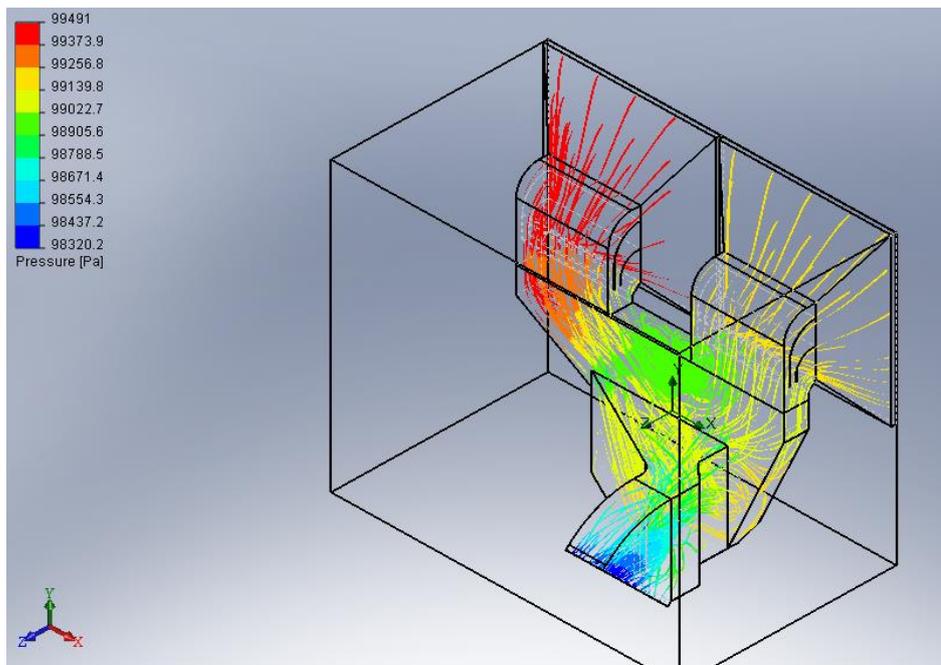


Рисунок 6.23. Визуализация течения в канале подвода газов к газоходу

По результатам исследования была проведена модернизация канала подвода газов к газоходу, что уменьшило сопротивление тракта на 22.7%.

Источником тепла для плавления цинка в ваннах горячего цинкования получили погружные газовые тупиковые горелки (рисунок 6.24).

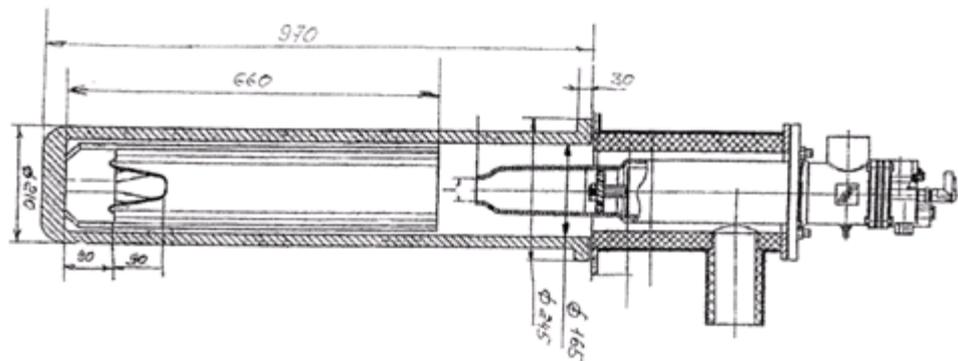


Рисунок 6.24 – Горелка тупиковая

Так, тупиковые горелки фирмы Fib, выполненные из керамических материалов, нашли применение в печах с защитной атмосферой и ваннах горячего цинкования на предприятиях УГМК, ОАО «ПНТЗ», KSB (г. Павлодар). В рамках программы импортозамещения решена задача разработки аналога рекуперативной горелки VICR и методики регулировки данного типа горелок.

По данным анализов продуктов сгорания в горелочных устройствах данного типа, классические методы настройки недостаточны. В силу особенностей сжигания газового топлива излучающая способность продуктов сгорания невелика, и для повышения эффективности в керамическую трубу устанавливается рассекатель. Геометрические параметры конструкции подбираются таким образом, чтобы обеспечить многократный проход газов между трубой и рассекателем за счет эжекционного эффекта во всем диапазоне регулирования. При невыполнении этого условия даже при поддержании оптимального стехиометрического соотношения газ–воздух и расходов сред резко возрастала температура трубы в районе сопла горелки и происходило растрескивание рассекателя (рисунок 6.26.).



Рисунок 6.25 – Температурные поля зон подвода газа и воздуха блока горелок

Сложность задачи обуславливал материал (карбид кремния), на основе которого изготавливали отечественные аналоги, отличаясь по теплопроводности, степени излучающей способности в интересующем диапазоне температур. Этот материал практически не поддавался механической обработке после спекания, что исключало коррекцию размеров после изготовления. Труба и рассекатель изготавливались в размер, соответствующий мощности горелки и температурному диапазону.

Анализ объемных полей температур и скоростей при известной геометрии горелок позволил установить, что наличие перегрева связано с отсутствием циркуляции вследствие образования вторичного вихря между соплом горелки и входом в рассекатель.

Отсутствие циркуляции приводило к повышению температуры отводимых газов и разрушению конструкции под действием температурных напряжений в материале.

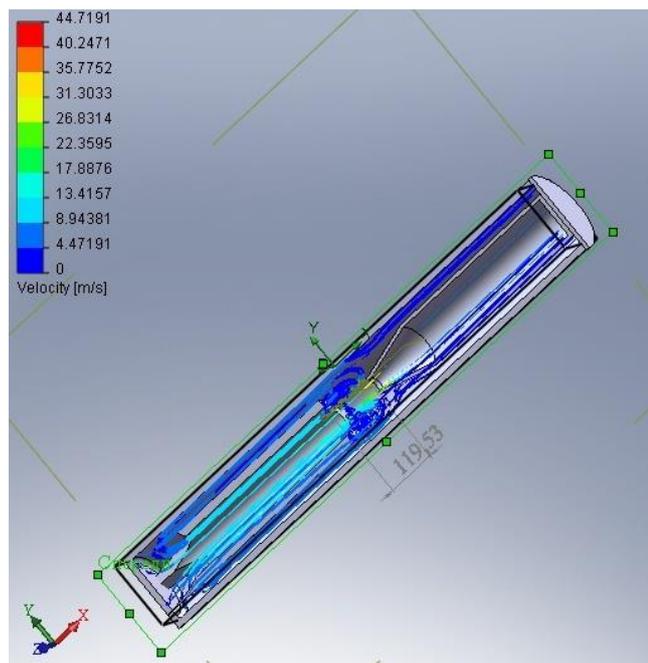


Рисунок 6.26 – Результат моделирования, подтвердивший запирание потока вторичным вихрем

Методика определения режимных параметров

Исходя из заданной геометрии рассекателя и горелки, а также зон и параметров нагреваемой среды (газ или жидкий металл), формировали граничные условия задачи.

С использованием модернизированной модели производили расчет объемного распределения температур и скоростей теплоносителя и среды теплосброса для ряда значений мощности горелочного устройства.

По результатам расчета варьировали геометрию трубы с целью обеспечения заданного зазора между рассекателем и границей горелки.

Оценивали передаваемую тепловую мощность и контролируемые поля температур.

Варьируемый параметр изменяли до получения максимальной тепловой мощности, снимаемой с единицы продуктов сгорания, при сохранении поля температур конструкции в допустимых по прочностным соображениям диапазонах.

Так, для горелки (рисунок 6.26) было установлено, что оптимальным с точки зрения передачи тепла является зазор между срезом горелки и рассекателем 59,53 мм, при этом скорость циркуляции в зонах труба–рассекатель 8,8-17,7 м/с. При падении скорости в зоне труба–рассекатель ниже 4.5 м/с происходит «запирание» канала вторичным вихрем, сопровождаемое резким падением теплопередачи и перегревом конструкции.

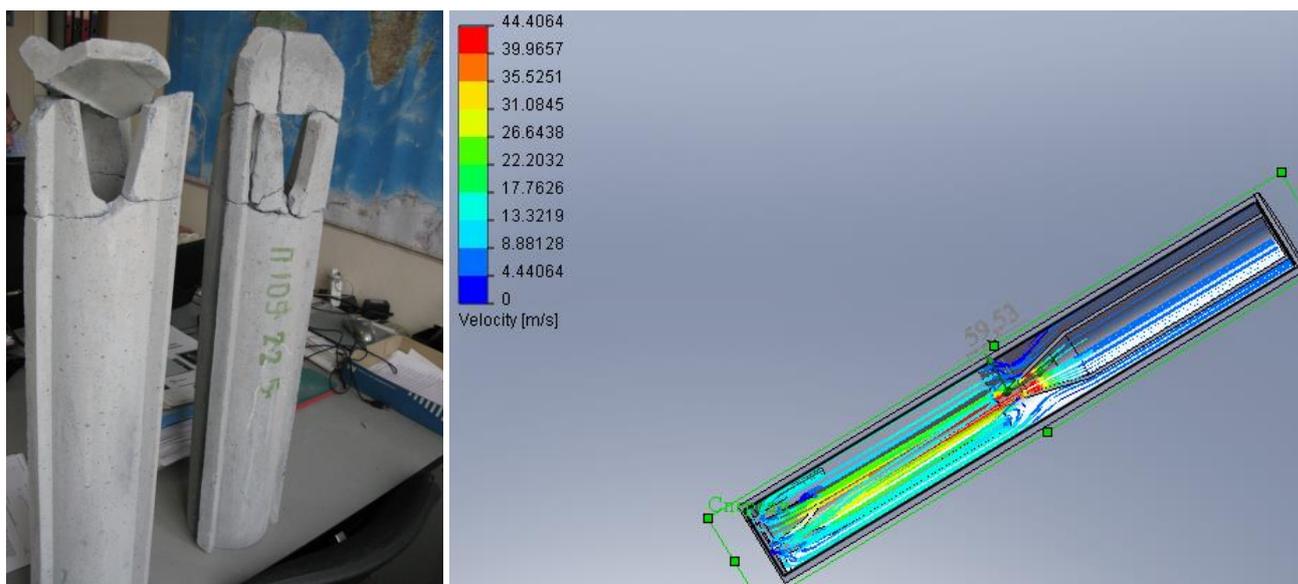


Рисунок 6.27 – Рассекатель и поля скоростей рабочей среды тупиковой горелки

Расчет позволил определить поле температур внешней поверхности, открытой для обзора и поле скоростей (см. рисунок 6.27), соответствующее оптимальному режиму работы горелки, а также рассчитать температуру отводящих газов, соответствующую оптимальному с теплофикационной точки зрения режиму.

Результаты работ следующие. Причиной отказов является локальный перегрев конструкции вследствие нарушения режима теплообмена. Это вызывало как прогары горелочных устройств, так и растрескивание рассекателей.

Методами моделирования процесса функционирования с контролем внешних температурных 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 тубы 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 температурных полей с последующей корректировкой режимных параметров горелочных устройств. Предложенный метод реализован при реконструкции ванн горячего цинкования завода «УралЭнергоДеталь» полученный экономический эффект 15207103 рубля.

6.4 Модернизация системы нанесения защитного никель кобальтового покрытия кристаллизаторов МНЛЗ

В ходе совместной работы с В.Г.Шеркуновым, А.Е.Власовым, П.Тезе и сотрудниками фирмы «SMS Cheltec» по выявлению причин разнотвёрдости никель-кобальтового покрытия кристаллизаторов МНЛЗ был применён метод анализа внешних температурных полей с последующим моделированием гидродинамических течений в ванне электролита. Использование комбинированного метода (см. рис. 6.28) позволило выявить и устранить причину

дефекта, связанную с возникновением застойных зон при выбранном варианте циркуляции электролита.

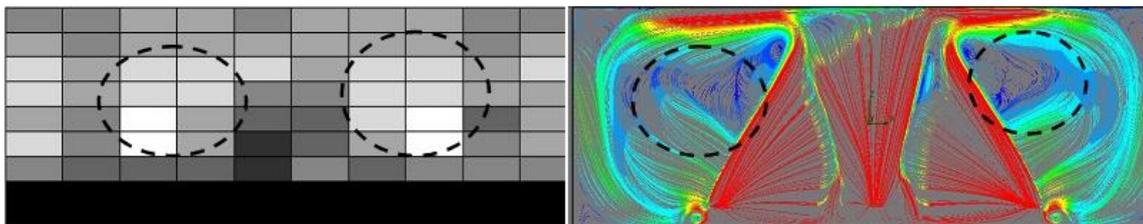


Рисунок 6.28 Сравнение полей твёрдости и зон циркуляции электролита при нанесении защитного покрытия на элементы кристаллизатора МНЛЗ №6 ММК до модернизации.

Как показали результаты моделирования, и замеры твёрдости, зоны пониженной твёрдости совпали с зонами низкой скорости циркуляции электролита. Для устранения данного негативного эффекта была изменена схема циркуляции электролита путём установки горизонтальной распределительной трубы. Применённый вариант модернизации позволил улучшить равномерность скоростей электролита в гальванической ванне (см. рис. 6.28) и снизить проявление эффекта разнотвёрдости на 55%.

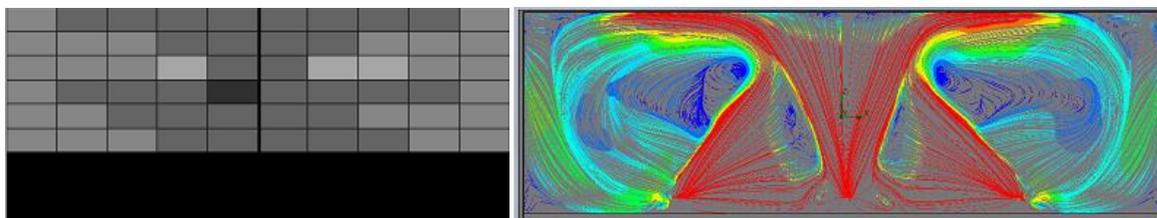


Рисунок 6.28 Сравнение полей твёрдости и зон циркуляции электролита при нанесении защитного покрытия на элементы кристаллизатора МНЛЗ №6 ММК после модернизации путём установки горизонтальной распределительной трубы.

6.5 Выводы по главе 6

1. Приведены результаты комплексной диагностики оборудования ОАО «ПНТЗ», АО «Уральская сталь». ПАО «Северский трубный завод»,
2. Произведена апробация методики первичной диагностики
3. Разработана методика определения оптимальных геометрических параметров тупиковых горелок металлургических агрегатов, применяемая

при их проектировании и настройке с целью обеспечения промышленной и экологической безопасности. Применение методики позволило увеличить стойкость трубы и рассекателя горелки, выполненного из отечественного материала, с 3,5 месяцев непрерывной работы до 6 месяцев безаварийной эксплуатации. Методика внедрена в производство.

4. Выявлены причин разнотвёрдости никель-кобальтового покрытия кристаллизаторов МНЛЗ был применён метод анализа внешних температурные поля с последующим моделированием гидродинамических течений в ванне электролита исключаящих разнотолщинность.

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 ООО 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 методики 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 в диапазоне давлений от 100 до 200 МПа узлов, 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, применяемая при их проектировании и настройке с целью обеспечения промышленной и экологической безопасности. Применение методики позволило увеличить стойкость тубы и раскателя 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. и 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 ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Смирнов, А.Н. Процессы непрерывной разливки: монография / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев и др. - Донецк: ДонНТУ, 2002. - 536 с.
- 2 Мартынюк, В. Ф. Анализ аварий и несчастных случаев в металлургии / В. Ф. Мартынюк, В. Ф. Матрохин, А. А. Сысоев. – М.: ООО Анализ опасностей, 2008. – 296 с.
- 3 Сысоев, А.А. Травматизм и аварийность в металлургии / А.А. Сысоев, В.Ф. Мартынюк, Б.С. Мастрюков // Металлург.- 2004. - № 2. - 29-32 с.
- 4 Годовой отчёт о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2006 году / Под ред. К.Б. Пуликовского М.: ОАО «НТЦ по безопасности в промышленности», 2007.- 508 с.
- 5 Обзор аварий и инцидентов в металлургической отрасли [электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.uralinform.ru/armnews/news73050.html>.
- 6 Виновным во взрыве печи на металлургическом заводе в Ревде (Свердловская область) признан простой сталевар [электронный ресурс]. /Российское информационное агентство/ - 2007. – Режим доступа: <http://www.uralweb.ru/news/n303829.html>.
- 7 Очередная авария на ММК [электронный ресурс]./РБК/ - 2007. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/society/07/08/2007/5703c87c9a79470eaf76667e>
- 8 Годовой отчёт о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2007 году / Под ред. К.Б. Пуликовского М.: ОАО «НТЦ по безопасности в промышленности», 2008. - 548 с.
- 9 Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору информирует об авариях и несчастных случаях, по которым завершено расследование [электронный ресурс]./ РОСТЕХНАДЗОР/ 2015. – Режим доступа:<http://don-nrs.gosnadzor.ru/news/64/785/>
- 10 Павлова, Г.А. Статистический анализ аварий и травматизма на металлургических предприятиях [электронный ресурс]/ Г.А. Павлова // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности».- 2011. - Выпуск №2 (36).- Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb>

11 Гамбаль, М.Ю. Состояние снабжения запасными частями горного производства / М.Ю. Гамбаль // Сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, - 2008.- С. 109-114.

12 Гилёв, А.В. Повышение эффективности эксплуатации буровой техники на горных предприятиях: монография / А.В. Гилёв, А.О. Шигин, В.Т. Чесноков, И.Р. Белозеров. - Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2013. - 372 с.

13 Лозовский, В.Н. Надежность гидравлических агрегатов./ В.Н. Лозовский - М.: Машиностроение, 1974.- 320 с.

14 Гребеник, В.М. Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование конвертерных и мартеновских цехов / В.М. Гребеник, Ф.К. Иванченко, Б.А. Павленко и др.: [Учеб. для вузов по спец. "Металлург. машины и оборуд." и "Металлургия черных металлов"] - Киев: Высш. шк., 1991. - 287 с.

15 Редников, С.Н. Муромцев, Н.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.

16 Бровман, М.Я Непрерывная разливка металлов./ М.Я Бровман - М.: Экомет, 2007. - 484 с.

17 Кащеев, И.Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок. Служба огнеупоров: Справочник в двух книгах / Под ред. И.Д. Кащеева, Е.Е. Грищенко. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002. - 656 с.

18 Аксельрод, Л.М. Антонов, Г.И. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок. Служба огнеупоров. В двух книгах / Л.М. Аксельрод, Г.И. Антонов, Под ред. И.Д. Кащеева, Е.Е. Грищенко.- М.: Интермет Инжиниринг, 2002. - 656 с.

19 Кащеев И.Д. Свойства и применение огнеупоров: Справочное издание./ И.Д. Кащеев - М.: Теплотехник, 2004. - 352 с.

20 Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-изд., доп. и перераб./ Е.И. Казанцев - М.: Metallurgy, 1975. - 368 с.

21 Кривандин, В.А. Филимонов Ю.П. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей./ В.А. Кривандин - М.: Metallurgy, 1986. - 479 с.

22 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.

23 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.

24 Лисиенко, В.Г. Теплофизика металлургических процессов./ В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев- М.: Metallurgy, 1995. - 240 с.

25 Frewing J.J. The heat of adsorption of long-chain compounds and their effect on boundary lubrication // Proc. Roy. Soc, Lond.. A. -1944. Vol. 181.- P. 270-285.

26 Редников, С.Н. Методика экспресс-диагностики узлов гидравлических систем / С.Н. Редников, Б.Б. Рахматуллин // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докладов Всероссийской науч.-техн. конф. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, - 2012. - С. 139-142.

27 Редников, С.Н. Комплексная диагностика металлургического оборудования: монография / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Е.Н. Ахмедьянова// - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 75 с.

28 Редников, С.Н. Переходный режим гидродинамики в теплообменных аппаратах /С.Н. Редников // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, - 1998. - С. 52-54.

29 Rednikov, S.Regenerative air heater from bed elements. Modelling, Advanced Process Technology, Expert and Control System of Heat and Mass Transfer Phenomena

/ S.Rednikov, E. Toropov // Collection of materials of International seminar. Ekaterinburg: USTU, - 1996. - P.96.

30 Алексеева, Т.В. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В.Алексеева, В.Д.Бабанская, Башта и др.- М.: Машиностроение, 1989 - 264 с.

31 Крассов, И.М. Гидравлические элементы в системах управления. 2-е изд., перераб. и доп./ И.М. Крассов - М.: Машиностроение, 1967. - 258 с.

32 Клорикьян, С.Х. Машины и оборудование для шахт и рудников. Справочник 6-е изд., стереотип / С.Х.Клорикьян, В.В.Старичнев, М.А.Сребный и др.- М.: Издание Московского государственного горного университета, 2000. - 471 с.

33 Махно, Д.Е. К вопросу о повышении надежности и безопасной работы экскаваторов на карьерах Севера/ Д.Е. Махно, А.Ю. Болотнев // Материалы докладов XII Всероссийской научно-практической студенческой конференции с международным участием «БЕЗОПАСНОСТЬ 07». Иркутск, - 2007. - С. 265-268.

34 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.- 2015.- Vol. 21. Issue.1 Recent Science. - P. 1159-1166.

35 Иванов, В.И. Техническая диагностика строительных, дорожных и коммунальных машин: Часть 1. Теоретические основы технической диагностики СДКМ Учебное пособие / В.И. Иванов, В.Н. Кузнецова, Р.Ф. Салихов, Е.А. Рыжих. - Омск: Изд-во СибАДИ, 2006.-. 132 с.

36 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.

37 Батаев, В.А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей: учеб. пособие. 2-е изд./ В.А. Батаев, А.А. Батаев, А.П. Алхимов - М.: Флинта: Наука, 2007.- 224 с.

- 38 Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 6-е./ Л.Г. Лойцянский - М.: Наука, 1987. 824 с.
- 39 Ляхтер, В.М. Гидравлическое моделирование/ В.М. Ляхтер, А.М. Прудовский-М.: Энергоиздат, 1984. - 392 с.
- 40 Патанкар, С. Численные методы решения задач и теплообмена и динамики жидкости / Патанкар С.Перевод с англ.; под ред. В.Д. Виленского. М.: Энергоатомиздат. 1984. - 152 с.
- 41 Жилин, П. А. Математическая теория неупругих сред/ П. А. Жилин // Успехи механики. - 2003. - Т. 2. №4.- С. 3-36.
- 42 Кондауров, В.И. Об уравнениях упруговязкопластической среды с конечными деформациями / В.И. Кондауров//Прикладная механика и техническая физика. - 1982. - №4. - С.133-139.
- 43 Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-еизд., испр./ А.А. Самарский, А.П. Михайлов - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 320 с.
- 44 Akhmedyanova, E.N. Unsteady modes of moisture removal / E.N. Akhmedyanova, O.S. Ptashkina-Girina //The Authors. Published by Elsevier Ltd-2015. - P.712.
- 45 День, И.К. Обобщенное стационарное уравнение Рейнольдса для неньютоновских жидкостей и его применение к подшипникам скольжения/ И.К. День, Х.Г. Элрод // Проблемы трения и смазки. - 1983. - №3. - С. 73-79.
- 46 Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя./ Г. Шлихтинг - М.: Наука, 1974. - 711 с.
- 47 Пухначев, В.В. Симметрии в уравнениях Навье-Стокса/ В.В. Пухначев // Успехи механики. - 2006.- №1. - С. 6-76.
- 48 Johnson M. A model for viscoelastic fluid behavior which allows nonaffine deformation/ M. Johnson, D. Segalman // J. Non-Newt. Fl. Mech.- 1977. - No. 2. - P. 255-270.
- 49 Зубович, С.О. Течение тяжелой вязкопластичной жидкости в зазоре вращающихся валков: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Волгоградский

государственный технический университет. / Зубович Сергей Олегович - Волгоград, 2007. - 156 с.

50 Bowden, F. P. Lubrication of metal surfaces by fatty acids/ F. P. Bowden, J. N. Gregory, D. Tabor // Nature. - 1945. - Vol. 156. 3952.- P. 97-99.

51 Дерягин, Б. В. Проблемы граничной смазки./ Б. В. Дерягин // Повышение качества и применение смазочных материалов. М.: Гостоптехиздат, - 1957. - С. 5-17.

52 Дерягин, Б. В. Исследование профиля скоростей и вязкости пограничных слоев металлом сдувания / Б. В. Дерягин, Е. Ф. Пичугин // Труды второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. - М.: Изд-во АН СССР, - 1947.- Т. 1.- С. 103.

53 Дерягин, Б. В., Кусаков М. М. Свойства тонких слоев и их влияние на взаимодействие твердых поверхностей/ Б. В. Дерягин, М. М. Кусаков //-М: Известия АН СССР. Хим. серия. -1936. -№5. - С. 741-752.

54 Браун, Э.Д. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д.Браун, И.А.Буяновский, Н.А. Воронин и др. Отв. ред. К.В. Фролов.- М.: Издательство ЛКИ, 2008. - 480 с.

55 Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения./ А.С. Ахматов // - М.: Физматгиз, 1963. - 472 с.

56 Hardy, W. B. Boundary Lubrication: Plane Surface and the Limitation of Amontons Law/ W. B. Hardy, L. Bircumshaw // Proc. Roy. Soc. London, A. - 1925. - Vol. 108. - P. 2-16.

57 Фукс, Г.И. Полимолекулярная составляющая граничного смазочного слоя // Исследования в области поверхностных сил./ Г.И. Фукс //- М.: Наука, - 1964. -С. 176-187.

58 Беркович, И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов / И.И. БерковичПод ред. Д.Г. Громаковского. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. - 268 с.

59 Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента при исследовании многокомпонентных систем / Под ред. И.Г.Зедгинидзе, Ф.С.Новик, Т.А. Чемлева и др.- М.: Металлургия, 1974. - 176 с.

60 Рогова, Б.В. Обзор моделей вязких внутренних течений/ Б.В. Рогова, И.А. Соколова // Математическое моделирование. -2002. -Т. 14. №1. - С.41-72.

61 Goldblatt, J. L. Industrial and Engineering Chemistry./ J. L. Goldblatt // Production Research Developments. - 1971. - Vol. 10. №3. - P. 270-278.

62 Вервейко, Н.Д. Влияние характерного линейного размера микроструктуры и времени релаксации на переходные процессы в тонких слоях / Н.Д. Вервейко, В.И. Просветов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. - 2013. - №2. - С. 141-147.

63 Гершуни, Г.З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости./ Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий - М: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972. -392 с.

64 Годунов, С.К. Элементы механики сплошной среды./ С.К. Годунов - М.: Наука, 1978. - 303 с.

65 Дерягин, Б.В. О природе маслянистости смазочных средств и методах ее количественной оценки / Б.В. Дерягин, Н.Н. Заховаева, М.М. Кусаков и др. // Сб. докладов Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. В 2-х т. М.: Изд-во АН СССР,- 1939. -Т. 1. - С. 519-534.

66 Рейнер, М. Реология./ М.Рейнер - М.: Наука, 1965. - 224 с.

67 Циклис, Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких давлениях. 4-е изд., перераб. и доп./ Д.С. Циклис - М.: Издательство «Химия», 1976.- 432 с.

68 Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов./ Г.И. Фукс - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 328 с.

69 Хинце, И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория / И.О. Хинце Перевод с англ. О.В. Яковлевского.- М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 680 с.

- 70 Томас, Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах / Т. Томас. Пер. с англ.; под ред. Л.М. Качанова. - М.: Мир, 1964. - 308 с.
- 71 Фрик, П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Часть 1./ П.Г. Фрик - Пермь: Пермский государственный технический университет, 1998.- 108 с.
- 72 Фрик, П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Часть 2. / П.Г. Фрик - Пермь: Пермский государственный технический университет, 1999. -136 с.
- 73 Седов Л.И. Механика сплошных сред. Том 1./ Л.И. Седов - М.: Наука, 1970. -492 с.
- 74 Самарский, А.А. Численные методы математической физики./ А.А. Самарский, А.В. Гулин - М.: Научный мир, 2000. - 316 с.
- 75 Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики./ Г. И. Марчук - М.: Наука, 1980. - 456 с.
- 76 Артемов, М.А. Вариационные принципы в механике сплошной среды: учеб. пособие для вузов./ М.А. Артемов, Ю.М. Мяснянкин, Т.Д. Семькина - Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011. - 57 с.
- 77 Бубенчиков, А.М. Математические модели течения и теплообмена во внутреннихзадачах динамики вязкого газа./ А.М. Бубенчиков -Томск: Томский университет, 1993.-182с
- 78 Левич, В.Г. Физико-химическая гидромеханика./ В.Г. Левич - М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. - 699 с.
- 79 Кривцов, А.М. К теории сред с микроструктурой / А.М. Кривцов // Труды СПбГТУ. -1992. - №443. - С. 9-17.
- 80 Зельдович, Я.Б. Химическая физика и гидродинамика. Избранные труды. / Я.Б. Зельдович - М.: Издательство «Наука», 1984. - 379 с.
- 81 Louis P. Hammett . Physical organic chemistry. Second Edition. / P. Hammett Louis - McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Columbia, - 1970. - 267 p.
- 82 Michael M. Khonsari, Mehdi Amiri «Introduction to Thermodynamics of Mechanical Fatigue»/ M. Michael - CRC Press, 2012. - 166 P.

83 Prat, Pere C. Microplane model for triaxial deformation of soils // Num. Models Geomech. NUMOG III: Proc. 3rd Int. Symp.,/ Pere C. Prat , Zdenek P. Bazant - Niagara Falls, 8-11 May, 1989. London; New York, - 1989. - P. 139-146.

84 Hayat, T. Stokes second problem for a Johnson–Segalman fluid / T. Hayat, S. Asghar, A. M. Siddiqui // Appl. Math. and Comp. - 2004. - No.148. - P. 697-706.

85 Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон Перевод с английского к.т.н. З.П. Шульмана.- М.: Мир, 1964. - 418 с.

86 Золотых, Е.В. Исследования в области высоких давлений./ Е.В. Золотых - М.: Издательство стандартов. 1987. 304 с.

87 Wright, B. European Activity Concerning Engine Oil Viscosity Classification - Part Iv - the Effects of Shear Rate and Temperature on the Viscosity of Multigrade Oils / B. Wright, N.M. van Os, J. A. Lyons // SAE Paper 830027 Society of Automotive Engineers, - 1983.- P. 67-76.

88 Гиматудинов, Ш.Т. Физика нефтяного и газового пласта./ Ш.Т. Гиматудинов - М.: Издательство «Недра», 1971. - 312 с.

89 Зарипов, З. И. Теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость непредельных углеводородов при давлениях до 200 МПа / З. И. Зарипов, Г.Х. Мухамедзянов, С. А. Булаев - Казань: Казанский государственный технологический университет. 2010. – 40 с.

90 Прокунин, А.Н. Лекции по реологии полимерных жидкостей. / А.Н. Прокунин - М.: Изд-во МГУ, 2011. 72 с.

91 Eringen, A.C. Theory of micropolar fluid/ A.C. Eringen // J. Math. Mech., V. 16, № 1, - 1966. - P. 1-16.

92 Fiton, M. Historical aspects and present development on thermal effects in hydrodynamic bearings. / M. Fiton, Y. Frene, R. Boncompain // Fluid film lubrication the Leeds-Lyon Symposium – Tribology series, 11. Elsevier Science Publishers, - 1987. - P. 27-47.

93 Rednikov, S.N. Viscosity characteristics of hydrocarbons at high pressures/ S.N. Rednikov // s. Published by Elsevier South -Ural State University, 76, Lenin Avenue-2015.-P. 844.

94 Леванов, И.Г. Обзор реологических моделей моторных масел, используемых при расчётах динамики подшипников скольжения коленчатого вала/ И.Г. Леванов // Вестник Южно-Уральский государственный Университет. г.Челябинск. - 2010. - С. 54-61.

95 Циглер, Франц. Механика твердых тел и жидкостей. 2-е изд. / Франц. Циглер Перевод с англ. В.Ю. Кирюхина.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. - 912 с.

96 Gecim, V.A. Non-Newtonian Effect of Multigrade Oils on Journal Bearing Performance/ V.A. Gecim // Tribology Transaction. - 1990. - V. 3. - P. 384-394.

97 Forbes E. S. Antiwear and extreme pressure additives for lubricants / E. S. Forbes // Tribology. - 1970. - Vol.3. №3. - P. 145-153.

98 Бартнев, Г.М. Физика полимеров / Г.М. Бартнев, С.Я. Френкель Под редакцией д-ра физ.-мат. наук Ельяшевича А.М.- Л.: Химия, 1990. - 432 с.

99 Фомина, М.Г. Динамическая вязкость и плотность гексена-1, гептена-1, октена-1 и децена-1 при температурах от 293 до 473К и давлениях до 245 МПа. Таблицы ССД. ГСССД. РСД 288-88./ М.Г. Фомина, Д.И. Сагдеев, Г.Х. Мухамедзянов - Деп. ВНИИКИ. 20.02. 1989. №528-кк-89. -17 с.

100Фортвов, В.Е. Теплофизические свойства веществ в экстремальных условиях. / В.Е. Фортвов - М.: Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, 2002.- 230 с.

101Ходаков, Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и её экспериментальное обоснование/ Г. С. Ходаков // Рос. хим. журн. - 2003. - Т. XLVII. №2. - С. 33-44.

102Терентьев, О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве./ О.А. Терентьев - М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1980. 248 с.

103Артемов, М. А. Вариационные принципы в механике сплошной среды./ М. А. Артемов, Ю.М. Мяснянкин, Т.Д. Семькина - Воронеж Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011.- 56 с.

- 104 Лойцянский, Л.Г. Ламинарный пограничный слой./ Л.Г. Лойцянский, - М.: Изд-во физико-математической литературы, 1962. - 480 с.
- 105 Павлов, А.Н. Разностные схемы с кинетически-согласованной искусственной вязкостью для решения уравнений Навье-Стокса на криволинейных ортогональных сетках / А.Н. Павлов, А.С. Чайка, Б.Н. Четверушкин // Математическое моделирование. - 1993. - Т. 5. №4. - С. 57-75.
- 106 Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров / Дей Хан. Чанг Пер. с англ. - М.: Химия, 1979. - 368 с.
- 107 Седов, Л. И. Механика сплошных сред. Том 2. / Л. И. Седов - М.: Наука, 1970. - 568 с.
- 108 Редников, С.Н. Моделирование течения в щелевых каналах непостоянного сечения/ С.Н. Редников, Е.В. Торопов // Математическое моделирование и краевые задачи: труды восьмой научной межвузовской конференции. Самара: Изд-во СГТУ, - 1998. Ч.2. - С. 65-67.
- 109 Тичи, Д.А. Исследование влияния вязкоупругости жидкости в подшипниках со сдавливаемой пленкой / Д.А. Тичи, В.О. Уинер // Проблемы трения и смазки. - 1978. - №1. - С. 58-68.
- 110 Харной, А. Течение в сдавливаемой пленке упругой жидкости при стационарном движении и динамических нагрузках/ А. Харной // Проблемы трения и смазки. - 1988. - №3. - С. 125-130.
- 111 Bowden, F. P. The Friction and Lubrication of Solids./ F. P. Bowden, D. Tabor - Oxford: Clarendon Press, 1950. - 544 P.
- 112 Frene, J. Hydrodynamic Lubrication. Bearings and Thrust Bearings. Tribology Series, 33./ J. Frene, D. Nicolas, B. Berthe M. Godet - Elsevier, 1997. - P.470.
- 113 Fillon, M. Numerical simulation and experimental results on thermo-elasto-hydrodynamic tilting pad journal bearings / M. Fillon, Y. Frene // IUTAM Symposium on Numerical Simulation of Non-isothermal Flow of Viscoelastic Liquids. Kluwer Academic Publishers, -1995. - P. 85-99.
- 114 Forbes, E. S. The load-carrying action of organosulphur compounds – a review/ E. S. Forbes // Wear. - 1970. - Vol. 15. №2. - P. 87-96.

115 Abraham, F. F. Simulating materials failure by using up to one billion atoms and the world's fastest computer/ F. F. Abraham, R. Walkup, H. Gao // Work-hardening. Proceedings of National Academy of Sciences (USA). - 2002. - V. 99. №9. - P. 5783-5787.

116 Четверушкин, Б.Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнений сплошных сред / Б.Н. Четверушкин // Математическое моделирование. -2012. -Т. 24. №11. - С. 33-52.

117 Гершуни, Г.З. Устойчивость конвективных течений./ Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий, А.А. Непомнящий - М.: Наука, 1989. -320 с.

118 Редников С.Н. Математическое моделирование реологических характеристик углеводородов при воздействии высоких давлений / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2013. - Т. 15. № 4-2. - С. 402-404.

119 Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 320 с.

120 Akhmedyanova, E.N. Unsteady modes of moisture removal / E.N. Akhmedyanova, O.S. Ptashkina-Girina //The Authors. Published by Elsevier Ltd-2015. - P.712.

121 Bhushan, B. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale/ B. Bhushan, J. Israelashvili, L. Landman // Nature. - 1995. - Vol.374. - P. 607-616.

122 Кондауров, В.И. Об уравнениях упруговязкопластической среды с конечными деформациями / В.И. Кондауров // Прикладная механика и техническая физика. - 1982. - №4. - С. 133-139.

123 Гуревич, М.И. Механика в СССР за 50 лет. Том 2. Механика жидкости и газа. / М.И. Гуревич - М.: Наука, 1970. - 880 с.

124 Кельш, Х.Р. Использование мощных карьерных гидравлических экскаваторов KOMATSU в Якутии / Х.Р. Кельш // Горный журнал. - 2006. - №1. - С. 69-71.

125 Балабышко, А.М. Использование силовых гидроцилиндров на угольных шахтах / А.М. Балабышко, И.С. Негруцкий // Научные сообщения. Техника и технология разработки угольных месторождений. М.: Национальный научный центр горного производства – Институт горного дела им. А.А. Скочинского. - 2007. - Вып. 333. - С. 77-81.

126 Редников, С.Н. Некоторые ошибки при решении задачи теплопроводности с подвижной границей раздела фаз / С.Н. Редников // Математическое моделирование и краевые задачи: сб. трудов тринадцатой межвузовской конференции. Самара - 2003. - С. 106-108.

127 Редников, С.Н. Определение температурных полей методами математического моделирования / С.Н. Редников, Е.В. Торопов, И.В. Елюхина // Математическое моделирование и краевые задачи: сб. тр. девятой научной межвузовской конференции. Самара: Изд-во СГТУ, - 1999. - Ч. 2. - С. 51-53.4

128 Редников, С.Н. Оптимизация конструкций насадок воздухонагревателей / С.Н. Редников, Е.В. Торопов // Энергоснабжение на промышленных предприятиях: Сб. статей. Магнитогорск: Изд-во МГМА, - 1997. - С. 48-52.

129 Ахмедьянова, Е.Н. Математическое моделирование процесса сушки древесных отходов / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. №1-2. - С. 382-385.

130 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5, доп./ С.С. Кутателадзе - М.: Атомиздат, 1979. - 416 с.

131 Ландау, Л.Д. Механика сплошных сред./ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: Гостехиздат, 1953. - 796 с.

132 Редников С.Н. Совершенствование теплогидравлических процессов в каналах насадок доменных воздухонагревателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук./ Редников Сергей Николаевич - Челябинск, 1998. 32 с.

133 Елизарова, Т. Г. Лекции. Математические модели и численные методы в динамике жидкости и газа. Подходы, основанные на системах квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений / Т. Г. Елизарова - М.: Физический факультет МГУ, 2005. - 224 с.

134 https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/571043/

135 Полянин, А.Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев, А. И. Журов - .: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 256 с.

136 Редников, С.Н. К вопросу применимости гипотез турбулентности к расчету течения жидкости в щелевых каналах при высоких давлениях / С.Н. Редников, Н.Н. Муромцев // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции. Ч. 2. Самара, - 2009. - С. 620-622.

137 Новожилов, И.В. Методы формирования приближенных математических моделей движения / И.В. Новожилов // Фундаментальная и прикладная математика. -2005. -Т. 11. №7. - С. 5-9.

138 Берже, П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль Пер. с французского Ю.А. Данилова. - М.: Мир, 1991. -368 с.

139Понтрягин, Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. / Л.С. Понтрягин - М.: Наука, 1974. - 331 с.

140 Быкова, М.И. Течение и деформирование материалов однородной микроструктуры: монография / М.И. Быкова, Н.Д. Вервейко, П.П. Сумец, С.А. Шашкина. - Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. - 192 с.

141 Биркгоф, Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие./ Г. Биркгоф - М.: Издательство иностранной литературы, 1963. - 244 с.

142 Брот, Р.А. Определение реофизических параметров газонасыщенных нефтей / Р.А. Брот, С.Е. Кутуков // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». - 2005. - №2. – с.11-15.

143 Великанова, Ю.В. Гидромеханика многофазных сред: учеб. пособ. / Ю.В. Великанова - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. - 166 с.

- 144 Стенли, Г. Фазовые переходы и критические явления / Г. Стенли Пер. с англ. А.И. Мицека и Т.С. Шубиной; под ред. академика С.В. Вонсовского. - М.: Мир, 1973. - 425 с.
- 145 Давид, Ф. Физика и химия твердого состояния органических соединений / Ф. Давид Пер. с англ. д-ра хим. наук Ю.А. Пентина - М.: Мир, 1967. - 720 с.
- 146 Гоникберг, М.Г. Химическое равновесие и скорость реакций при высоких давлениях. Изд. 2-е, перераб. и доп. / М.Г. Гоникберг - М.: Издательство Академия наук СССР, 1960. - 273 с.
- 147 Брусиловский, А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа./ А.И. Брусиловский - М.: Издательство «Грааль».2002. - 575 с.
- 148 Kingsbury, E. P. Some aspects of thermal desorption of a boundary lubricant / E. P. Kingsbury // J.Appl. Phys.- 1958. - Vol.29. №6. - P. 888-891.
- 149 Hardy, W. Boundary Lubrication — The Paraffin Series / W. Hardy, I. Doubleday // Proc. Roy Soc. Lond. A 100. - 1922. - P. 550-574.
- 150 Grew, W. J. Thermodynamics of boundary lubrication and scuffing / W. J. Grew, A. Cameron // Proc. Roy. Soc, Lond., A. - 1972. - Vol.327. - P.47-59.
- 151 Гринфельд, М.А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений. / М.А. Гринфельд - М.: Наука, 1990. - 312 с.
- 152 Ершов, Б.И. Утечки жидкости в узлах гидростатических машин и устройств / Б.И. Ершов, А.В. Михневич, Р.Е. Чудновская // Вестник машиностроения. - 1987. - №1. - С. 26-28.
- 153 Пракаш, Д. Теория сдавливания пленок микрополярных жидкостей / Д. Пракаш, П. Синха // Проблемы трения и смазки. - 1976. - №1. - С. 147-153.
- 154 Kardiadakis, G. Microflows and nanoflows / G. Kardiadakis, A. Beskok, N. Алиги // Fundamentals and simulation. Springer.- 2005.- P. 817.
- 155 Paranjpe, R.S. Analysis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finite Journal Bearings Including Mass Conserving Cavitation / R.S. Paranjpe // Trans ASME Jour of Trib. - 1992. - V.114. - P. 736-746.

156 Гаврилов, А.В. Термические свойства непредельных углеводородов при давлениях до 147 МПа / А.В. Гаврилов, З.И. Зарипов, С.А. Булаев, Г.Х. Мухамедзянов // Кафедра вакуумной техники электрофизических установок. Казанский государственный технологический университет. Казань 2002.- С. 40.

157 Misra, J.C. A mathematical model for the study of blood flow through a channel with permeable walls / J.C. Misra, S.K. Ghosh // Acta mech. - 1997. -№1-4. V. 122. - P. 137-153.

158 Takahashi, K. Continuum mechanics for higher stage micropolar materials. st report. Kinematics / K. Takahashi, K. Shizawa // Jap. Soc. Mech. Eng. A. 55, - 1989. - №519. - P. 2356-2361.

159 Бугаенко, Л.Т. Химия высоких энергий./ Л.Т. Бугаенко, М.Г. Кузьмин, Л.С. Полак - М.: Химия, 1988. - 368 с.

160 Костановский, А.В. Исследование фазового перехода «твердое тело-жидкость» высокотемпературных материалов методом бесконечно тонкой пластины / А.В. Костановский, М.Е. Костановская // ИТЭС ОИВТ РАН. Москва. - 2002. - С. 3.

161 Скрипов В.П. Концепция метастабильности и фазовые переходы./ В.П. Скрипов - Екатеринбург: Институт теплофизики УрО РАН. 2002. – 210 с.

162 Yousif, A.E. Hydrodynamic Behavior of Two-Phase (Liquid-Solid) Lubrication/ A.E. Yousif, S.M. Nacy // Wear. - 1981. - V. 66. - P. 223-240.

163 Виноградов, Г. В. Механизм противоизносного и антифрикционного действия смазочных сред при тяжелых режимах граничной смазки / Г. В. Виноградов, Ю. Я. Подольский // О природе трения твердых тел. Минск: Наука и техника, - 1971. - С. 281-304.

164 Резников, М. Е. Топлива и смазочные материалы для летательных аппаратов./ М. Е. Резников - М.: Воениздат, 1973. - 232 с.

165 Скрипов, В.П. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В.П.Скрипов, Е.Н.Синицын, П.А.Павлов и др. - М.: Атомиздат. 1980. - 208 с.

166 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. Том 16. №1(2). Самара, - 2014. - С. 515-517.

167 Никольский, Б.Н. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство: Учеб. пособие для вузов 2-е изд., перераб. и доп./ Б.Н. Никольский, Н.А. Смирнова, М.Ю. Панов, Н.В. Лутугина, В.В. Пальчевский, А.А. Пендин, Ф.А. Белинская, О.К. Первухин, А.К. Чарыков; под ред. акад. Б.П. Никольского. - Л.: Химия, 1987. - 880 с.

168 Герасимов, Я.И. Курс физической химии Т. 2, Изд. 2-е, испр. / Я.И. Герасимов, В.П. Древинг, Е.Н. Еремин, А.В. Киселев., В.П.Лебедев, Г.М. Панченков, А.И.Шлыгин. под ред. чл.-корр. АН СССР проф. Я. И. Герасимова. - М.: Химия, 1973. - 624 с.

169 Булатов, Н.К. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. / Н.К. Булатов, А.Б. Лундин - М.: Химия, 1984. - 336 с.

170 Герасимов, Я.И. Курс физической химии Т. 1. / Я.И. Герасимов, В.П. Древинг, Е.Н. Еремин, А.В. Киселев., В.П.Лебедев, Г.М. Панченков, А.И.Шлыгин. - М.: Химия, 1964. - 624 с.

171 Чичинадзе, А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. 2-е изд. / Под ред. А. В. Чичинадзе.- М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.

172 Rowe, C N. Some aspects of the heat of adsorption in the function of the boundary lubricant / C. N. Rowe //ASLE Trans. - 1966. - Vol. 9. № I. - P. 101-111.

173 Spikes, H. A. Scuffing as a desorption process – explanation of Borsoff effect / H. A. Spikes, A. Cameron // ASLE Trans. - 1974. - Vol. 17. № 2. - P. 92-96.

174 Wada, S. Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearings by Pseudoplastic Lubricants/ S. Wada, H. Hayashi // Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng. - 1971. - V. 14. - P. 268-286.

175 Лобанова, О.А. Неравновесность фазового поведения углеводородных систем / О.А. Лобанова, И.М. Индрупский // Электронный журнал «Георесурсы,

геоэнергетика, геополитика». - 2012. - Выпуск 1(5). - С. 19. Режим доступа: www.oilgasjournal.ru

176 Warren, W. Micropolar and nonlocal effects in spatially-periodic, two-dimensional structures / Warren, E. William, E. Byskov // Rept. R 37, - 1997. - P. 1-49.

177 Zaslavsky, Y. S. Antiwear, extreme pressure and antifriction action of friction polymer formation additives / Y. S. Zaslavsky // Wear. - 1972. -Vol. 20. -P 287-297.

178 Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. Ч. 1. Динамика многофазных сред. / Р.И. Нигматулин - М.: Наука, 1987. -464 с.

179 Воскресенский, В.Л. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник. / В.Л. Воскресенский, В.И. Дьяков - М.: Машиностроение, 1980. - 224 с.

180 Вервейко, Н.Д. К устойчивости формы сдвигового течения микроструктурной вязкой жидкости в узких криволинейных каналах / Н.Д. Вервейко, С.А. Ноаман, А.И. Шашкин // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. - 2014. - №1. - С. 56-63.

181 Мантатов, В.В. Элементарный акт процесса размягчения стеклообразных систем в модели возбужденного состояния / В.В. Мантатов, Б.Д. Сандитов, Д.С. Сандитов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. - 2009. - Т. 51. №9. - С. 932-943.

182 Просветов, В.И. Поведение материалов в тонких переходных слоях с учетом конечности представительных элементов и времени релаксации / В.И. Просветов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов международной конференции. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета,- 2011. - С. 325-328.

183 Сандитов, Д.С. Вынужденная эластичность и параметр Грюнайзена аморфных полимеров / Д.С. Сандитов, В.В. Мантатов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. - 1991. - Т. 33. №2. - С. 119-123.

184 Сандитов, Д.С. Решеточный параметр Грюнайзена и вынужденная эластичность аморфных полимеров / Д.С. Сандитов, В.В. Мантатов // Релаксационные явления и свойства полимерных материалов: тезисы докладов Всес. конф. Воронеж, - 1990. - С. 80-83.

185 Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред. В 2 ч. Ч.2. Динамика многофазных сред. / Р.И. Нигматулин - М.: Наука, 1987. - 360 с.

186 Прокопьев, В.Н. Гидромеханические характеристики сложнонагруженных подшипников скольжения, смазываемых микрополярными жидкостями / В.Н. Прокопьев, Е.А. Задорожная// Двигателестроение.- 2009. - МЛ. - С. 39-44.

187 Сакураи, Т. Роль химии в смазке сосредоточенных контактов / Т. Сакураи // Проблемы трения и смазки. - 1981. - Т. 103. №4. - С. 1-14.

188 Хебда, М. Справочник по триботехнике В 3т. Т. 1: Теоретические основы. / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинидзе. - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.

189 Хебда, М. Справочник по триботехнике. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под ред. М.Хебды и А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1990. - 416 с.

190 Нестеров, А.Е. Фазовое состояние растворов и смесей полимеров / А.Е. Нестеров, Ю.С. Слипатов - Киев: Наукова Думка, 1987. - 168 с.

191 Hardy, W. B. Boundary Lubrication – The Latent Period and Mixtures of Two Lubricants / W. B. Hardy// Proc. Roy. Soc, London. Л. - 1923. - Vol. 104. - P. 25-39.

192 Ахматов, А.С. Силы атомно-молекулярных взаимодействий, формирование и структура граничных смазочных слоев. Граничный слой как квазитвердое тело / А.С. Ахматов // Труды Второй всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т.3. М.-Л., - 1949. - С. 133-154.

193 Гаркунов, Д.Н. Триботехника: Учебник для ВУЗов. 2-е изд./ Д.Н. Гаркунов - М.: Машиностроение, 1989. - 328 с.

194 Бучаченко, А.Л. Химическая поляризация электронов и ядер./ А.Л. Бучаченко - М.: Наука, 1974. - 246 с.

195 Воскресенский, В.А. Расчёт и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): справочник. / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков - М.: Машиностроение, 1980. - 224 с.

196 Евдокимов, И.Н. Молекулярные механизмы вязкости жидкости и газа: Методическое пособие. Часть I. Основные понятия. / И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. - 59 с.

197 Chevrier, P. Spall fracture: Mechanical and microstructural aspects / P. Chevrier, J.R. Klepaczko // Engineering Fracture Mechanics. - 1999. - V. 63. № 3. - P. 273-294.

198 Краснов, К.С. Физическая химия. Строение вещества. Термодинамика: Учеб. для вузов / под ред. К.С.Краснова - М.: Высш. шк., 2001. - 512 с.

199 Гаркунов, Я Н. Об атомарном схватывании материалов при трении / Я Н. Гаркунов, И.В. Крагельский // Доклады АН СССР. - 1957. - Т. 113. №2. - С. 326-332.

200 Матвеевский, Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий. / Р.М. Матвеевский - М.: Наука, 1971. 227 с.

201 Богданов, И. Ф. Химические процессы при высоких давлениях. / И. Ф. Богданов - М.-Л.: Издательство академии наук СССР, 1935. - 200 с.

202 Урядов, В.Г. Взаимосвязь динамической вязкости углеводородов с топологическим индексом Винера / В.Г. Урядов, Н.В. Аристова, Е.Н. Офицеров // Журнал физической химии. -2007. - Т. 81. №4. - С. 746-749.

203 Сагдеев, Д.И. Компьютерное моделирование методом симплексных решеток плотности и вязкости многокомпонентных смесей непердельных углеводородов в широком диапазоне изменения параметров состояния / Д.И.Сагдеев, А.А.Хубатхузин, М.Г.Фомина, Е.С. Воробьев,и Г.Х. Мухамедзянов // Казанский государственный технологический университет. Казань, - 2002.- С. 5.

204 Кулиев, А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. Издание 2-е, перераб. / А.М. Кулиев - Л.: Химия. 1985. -312 с.

205 Хан, Х. Теория упругости: основы линейной теории и ее применения / Х. Хан Пер. с нем. М.: Мир, 1988. -344 с.

206 Ершов, Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов./ Г.С. Ершов, В.А. Черняков - М.: Металлургия, 1978. -248 с.

207 Бахвалов, Н. С. Численные методы./ Н. С. Бахвалов - М.: Наука, 1973. - 631 с.

208 Раялингхам, Г. Стационарные характеристики гидродинамического радиального подшипника с псевдопластической смазкой /Г. Раялингхам, Б.С. Прабху, В.А. Рао // ТАОИМ. Серия Ф. Проблемы трения и смазки. -1979. - №4. - С. 117-124.

209 Холпанов, Л.П. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела./ Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов - М.: Наука, 1990. - 271 с.

210 Таранова, Л.В. Механизм действия депрессорных присадок и оценка их эффективности / Л.В. Таранова, Ю.П. Гуров, В.Г. Агаев // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - №4. - С. 90-91.

211 Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский - М.: Машиностроение, 1977. - 189 с.

212 Безуглый, В.Д. Полярография в химии и технологии полимеров. 3-е изд., перераб. и доп./ В.Д. Безуглый - М.: Химия, 1989. - 256 с.

213 Вилков, Л.В. Физические методы исследования в химии. Резонансные и электрооптические методы: Учеб. для хим. спец. вузов./ Л.В. Вилков, Ю.А. Пентин - М.: Высш. шк., 1989. - 288 с.

214 Хрущев, М.Л. Новый вид испытаний смазочных масел/ М.Л. Хрущев, Р.М. Матвеевский // Вестник машиностроения. -1954. -№1. -С. 12-18.

215 Сакураи, Т. Исследование кинетики взаимодействия меченых серосодержащих соединений со сталью в процессе граничного трения / Т. Сакураи, С. Икеда, Х.Окабе // Новое о смазочных материалах: Избранные

доклады на Международной конференции по смазочным материалам, Вашингтон, 1964 г. / Пер. с англ.; под ред. Г. В. Виноградова. М.: Химия, - 1967. - С. 121-137.

216 Эринген, А.К. Теория микрополярной упругости / А.К. Эринген // Разрушение. М.: Мир, - 1975. - Т. 2. - С. 646-751.

217 Georges, J.M. Some surface aspects of tribology // New Directions in Tribology / J.M. Georges // Ed. by I. M. Hutchings. Bury. St. Edmundsand London: MER - 1997. - P. 67-82.

218 Гото, М. Введение в микромасштабную высокоэффективную жидкостную хроматографию / М.Гото, К. Джинно, Д. Исии, М. Сайто и др.; Пер. с англ. канд. хим. наук Д.Н. Соколова.- М.: Мир, 1991.- 240 с.

219 Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания./ Б. Д. Сумм, Ю.В. Горюнов - М.: Химия, 1976. -231 с.

220 Тодер, И. А. Математическая модель термоэластогидродинамических процессов в тяжело нагруженных и высокоскоростных гидродинамических, гидростатических и гидростатодинамических подшипниках / И. А. Тодер, Е.С. Кренделев // Износостойкость машин. Брянск, - 1994.- С 41-49.

221 Каплан, С.З. Вязкостные присадки и загущенные масла. / С.З. Каплан, И.Ф. Радзевенчук - Л.: Химия: Ленингр. отд-ние, 1982. - 136 с.

222 Мастрюков, Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Том 2. Расчеты металлургических печей. / Б.С. Мастрюков - М.: Металлургия, 1978. 272 с.

223 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.

224 Харной, А. Анализ релаксации напряжений в упруговязкой жидкой смазке радиальных подшипников / А. Харной // Проблемы трения и смазки. - 1977. - №2. - С. 159-168.

225 Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов: монография./ А.Г. Хачатурян - М.: Наука, 1974. - 384 с.

226 Кузьменко, О. Ю. Ротационные вискозиметры с СВЧ системой преобразования контролируемого параметра: автореф. дис. ... канд. техн. наук. /Кузьменко Олег Юрьевич - Тамбов, 2003. 13 с.

227 Wharton, A. J. Diesel Engines 3rd Edition./ A. J. Wharton - Imprint: Butterworth-Heinemann. 1991. - P. 144.

228 Зарипов, З.И. Изобарная теплоемкость и температуропроводность смесей полиэтиленгликолей при давлениях до 196 МПа / З.И. Зарипов, С.А. Булаев, Г.Х. Мухамедзянов // Кафедра вакуумной техники электрофизических установок. Казанский государственный технологический университет. Казань. - 2002 - с. 40-43

229 Зубович, С.О. Течение тяжелой вязкопластичной жидкости в зазоре вращающихся валков: дис. ... канд. физ.-мат. наук./ Зубович Сергей Олегович. Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2007. - 156 с.

230 Иванов, В.В. Массообмен, углеводородообразование и фазовые переходы в осадочных бассейнах. / В.В. Иванов, И.С. Гулиев - Баку: Издательство «Нафта-Пресс», 2002. - 108 с.

231 Burton, R.A. Analytical Investigation of Viscoelastic Effects in the Lubrication of a Rolling Contact/R.A. Burton //ASLE Trans. - 1960. - V.3. №1. - P.111-134

232 Trent Bruce G. Microstructural effects in static and dynamic numerical experiments / С. Trent Bruce // Key Quest. Rock Mech.: Proc. 29th U.S. Symp. Minneapolis, 13-15 June, 1988. Rotterdam; Brookfield, - 1988.- P.395-402.

233 Ахматов, А.С. Лабораторный практикум по физике. / А.С. Ахматов, В.М. Андреевский, А.И. Кулаков - М.: Высшая школа, 1980. - 358 с.

234 Редников, С. Н. Проблемы исследования вязкости углеводородов при высоких давлениях / С. Н. Редников // Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, - 2012. - С. 107-112.

235 Редников, С.Н. Оборудование для исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С. Н. Редников // Вестник Самарского

университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2012. - №3-1 (34). - С. 157-161.

236 Редников, С.Н. К вопросу об определении вязкости при высоких давлениях / С. Н. Редников // Динамика машин и рабочих процессов: Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции 8-10 декабря 2009. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, - 2009. С.89-93

237 Климентьев К.Е. Системы реального времени: обзорный курс лекций./ К.Е. Климентьев - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2008. - 45 с.

238 Найгерт, К.В. Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства/ К.В. Найгерт, С.Н. Редников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2016. - Т. 16. №2. - С. 23-32.

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

240 Кельш, Х.Р. Прогнозирование ресурса гидравлических насосов и моторов гидроприводов карьерных экскаваторов при их эксплуатации в условиях низких температур / Х.Р. Кельш, Г.С. Бродский // Горное оборудование и электромеханика. - 2008. - №11. - С. 35-37.

241 Климентьев, К.Е. Основы графического программирования в среде LabVIEW: учеб. пособие./ К.Е. Климентьев - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2003. - 69 с.

242 Собко, А.А. Вычисление теплот превращений для фазовых переходов первого рода / А.А. Собко // Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова. - 2002. - С. 5.

243 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.

244 Редников, С.Н. Методы исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа/ С.Н. Редников, Е.Н. Ахмедьянова // *Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 3. Материалы VII международного симпозиума.* М.: РАН, - 2012. - С. 49-54.

245 Редников, С.Н. Об особенностях определения температуры при высоких давлениях./ С.Н. Редников, Н.Н. Муромцев // *Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции 8-10 декабря 2009.* Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. С.

246 Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям./ И. Е. Идельчик - М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

247 Редников, С.Н. Разработка ротационного вискозиметра высоких давлений для исследования свойств неньютоновских жидкостей / С.Н. Редников, И.Н. Султанов // *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение.*- 2011. - №11. Вып. 17. - С. 38-42.

248 Гринспен, Х. Теория вращающихся жидкостей / Х. Гринспен Пер. с англ. Э.А. Гурмузовой (гл. II-IV, VI) и Р.В. Пяковского (гл. I, V).- Ленинград: Издательство «Гидрометеиздат», 1975. -304 с.

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

250 Cambou V. Change of scale in granular materials / V. Cambou, M. Chaze, F. Dedecker // *Eur. J. Mech.* - 2000 - V. 19, № 6,- P. 999-1014.

251 Редников, С.Н. Определение вероятности перехода смазочной среды в твердую фазу под действием механических силовых полей // *Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т. 3/ С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Материалы IX международного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева.* Москва: РАН, - 2014.-С. 82-90.

252 Драго, Р. Физические методы в химии. / Р. Драго - М.: Мир, 1981.- 422 с.

253 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.

254 Редников С.Н., Булгакова Р.И. Релаксационные эффекты в углеводородах после нагружения гидростатическим давлением / С.Н. Редников, Р.И. Булгакова // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LIII международной научно-технической конференции. под редакцией П. Г. Свечникова. - 2014. - С. 50-54.

255 Редников, С.Н. Зависимость внутренней энергии однокомпонентной углеводородной системы от размера частицы 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.

256 Редников, С.Н. Исследование углеводородов при сверхвысоком давлении / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Достижения науки – агропромышленному производству. Ч. VI: материалы LIV международной научно-технической конференции. Челябинск,- 2013. - С. 240-241.

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

258 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.67-74

259 Редников, С.Н. Проблемы исследования вязкости углеводородов при высоких давлениях / С.Н. Редников // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Математика. Механика. Физика. - 2012. - С. 107-112.

260 Редников, С.Н. Проблемы определения реологических характеристик углеводородов в области высоких давлений / С.Н. Редников // Динамика и виброакустика машин: сб. трудов 2-й международной научно-технической конференции. - 2014. - С. 203-205

261 Редников, С.Н. Оборудование для исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 МПа / С.Н. Редников // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ: Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. Самара, - 2012. - С. 102-104

262 Редников, С.Н. Оборудование для исследования свойств углеводородов при давлениях свыше 150 бар / С.Н. Редников // Международный научно-технический форум: сб. трудов СГАУ. Самара, - 2013. - с.156-158

263 Редников, С.Н. Влияние размера молекул на вязкостные аномалии растворов технических углеводородов / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Наука и технологии: материалы XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Т. 2. М.: РАН, - 2014. - С. 86-97.

264 Редников, С.Н. Влияние электромагнитного поля на температуру рабочей среды магнитореологической системы / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Актуальные проблемы трибологии: сб. трудов международной научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, - 2015. - С. 72-74.

265 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 ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. -2014. - №36. - С. 143-154.

266 Редников С.Н. Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред / С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. - 2016.- Т. 16. №2. - С. 52-60.

267 Редников, С.Н. Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства / С.Н. Редников, К.В.

Найгерт // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. - 2016. - Т.14. №2. - С. 23-32.

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

269 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. №30.

270 Самарский, А.А. Устойчивость разностных схем / А.А. Самарский, А.В. Гулин.- М.: Наука., 1973. - 416 с.

271 Редников, С.Н. Вязкостные характеристики углеводородов в области высоких давлений / С.Н. Редников // Труды научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг". Режим доступа: <http://icie-rus.org/icie2015-rus.html>. С. 22-25.

272 Пат. 127906 РФ, МПК G01H 1/00. Устройство для диагностики неисправностей технического оборудования / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. №13. С. 145.

273 Коновалов, В.М. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. / В.М. Коновалов, В.Я. Скрицкий, В.А. Рокшевский - М.: Машиностроение, 1976. -288 с.

274 Редников, С.Н. Особенности диагностики и ремонта гидрооборудования на предприятиях Российской Федерации / С.Н. Редников // Безопасность критических инфраструктур и территорий: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции и XIV школы молодых учёных. Екатеринбург: УрО РАН, - 2011. - С. 183-185.

275 Пат. 127222 РФ, МПК G09B 9/00. Двухсторонний учебно-диагностический модуль для обучения персонала промышленных предприятий / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. №11. С. 149.

276 Пат. 127950 РФ, МПК G02B 21/00. Учебно-демонстрационная система для визуализации процессов микромира / С.Н. Редников // БИПМ. 2013. №13. С. 164.

277 Пат. 131527 РФ, МПК G09B 9/00. Гидравлическая монтажная плита / С.Н. Редников // БИПМ. 2013 №23. С. 111.

278 Редников, С.Н. Диагностика гидравлических систем/ С.Н. Редников, К.В. Найгерт // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LV международной научно-технической конференции. Челябинск: ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», - 2016. - С. 294-299.

279 Пат. 2505551 РФ, МПК C08F. Способ получения противотурбулентной присадки с рециклом мономеров, способ получения противотурбулентной присадки, способ получения высших полиолефинов для этих способов и противотурбулентная присадка на их основе / И.А. Малыхин, Р.Р.Рамазанов, К.А.Лосев, С.Н.Челинцев, Ю.В.Сулейманова // БИПМ. 2014. №3.

280 Артемов, М.А. О постановке задач исследования существования состояния деформируемого тела, сохранности его формы и сходимости метода малого параметра / М.А. Артемов, О.Д. Горбенко, Н.В. Минаева. // Вестник факультета прикладной математики и механики. - 2000. - Вып. 2. - С. 12-16.

281 Пат. 2614428 РФ, МПК F38D 17/04. Регенеративный воздухонагреватель / Е.Н. Ахмедьянова, С.Н. Редников, О.С. Пташкина-Гирина // БИПМ. 2017. №10.

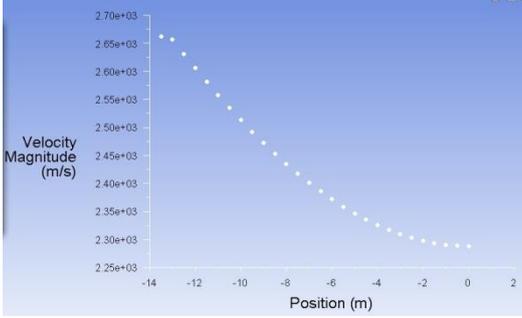
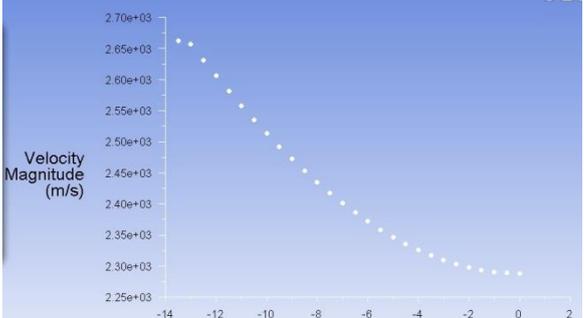
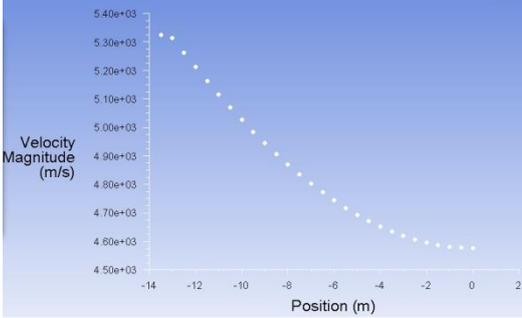
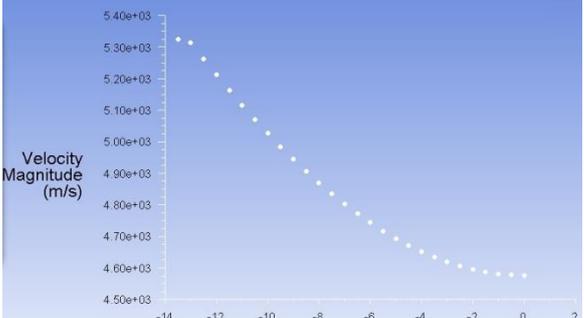
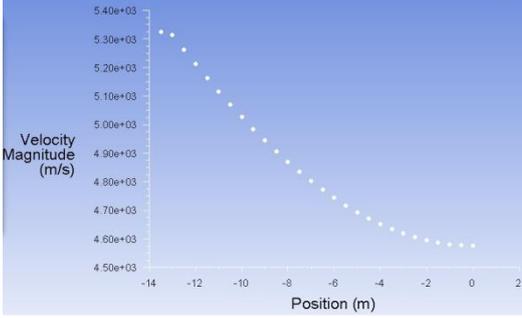
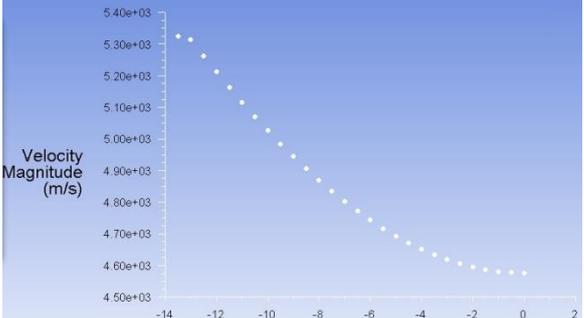
Приложения

Приложение

Таблица 1 – Профили скоростей в глицерине.

Частота вращения в об/мин	Глицерин распределение скоростей в зазоре	
500	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
	Давление 150 МПа	Давление 300 МПа
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
1000	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа

Продолжение таблицы 1

Частота вращения я В об/мин	Глицерин распределение скоростей в зазоре	
1000		
	Давление 150 МПа	Давление 300 МПа
2000		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
		
	Давление 150 МПа	Давление 300 МПа

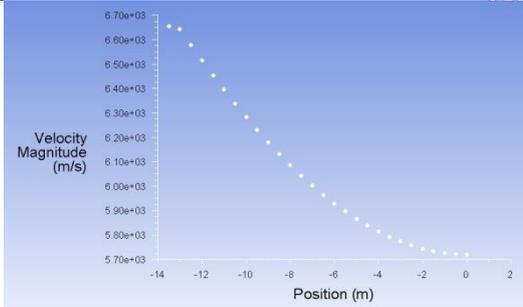
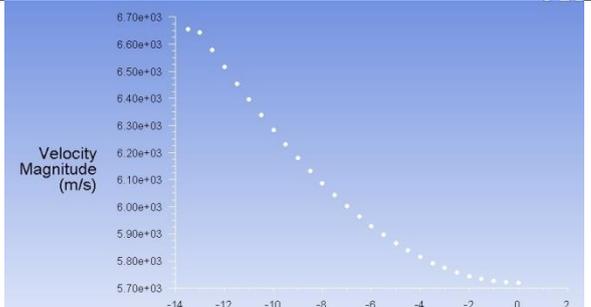
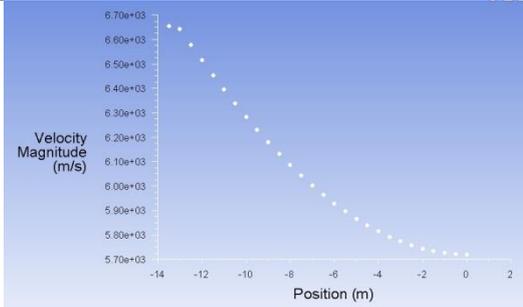
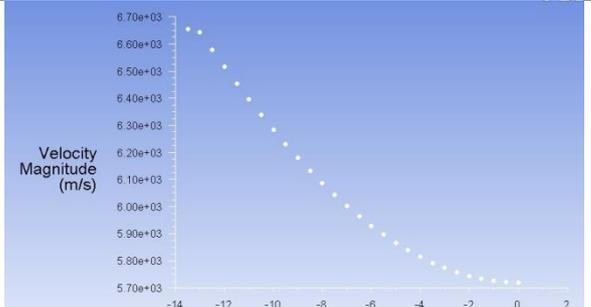
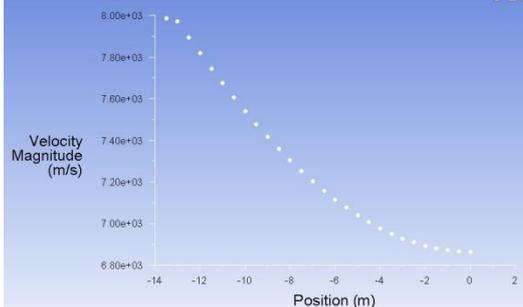
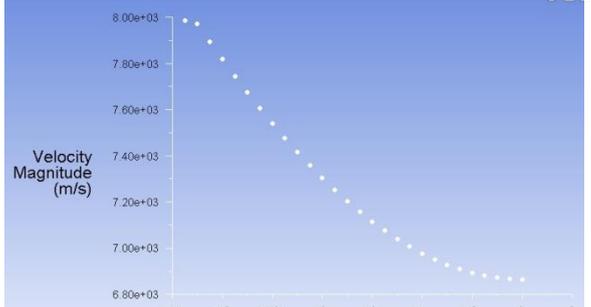
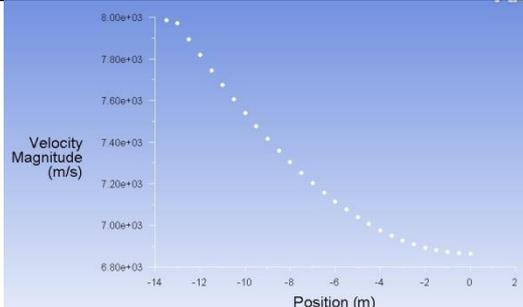
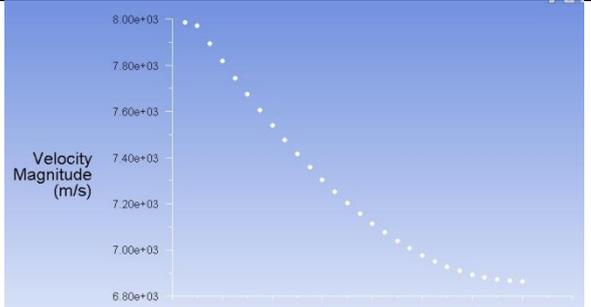
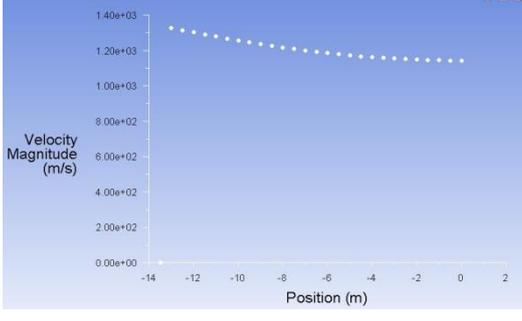
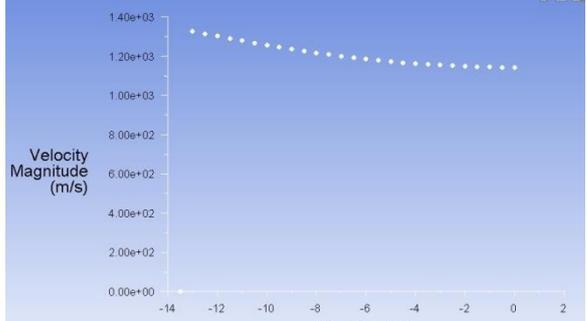
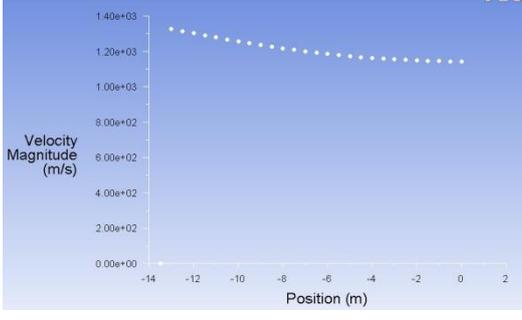
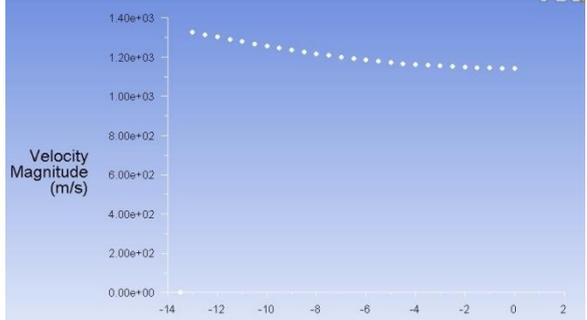
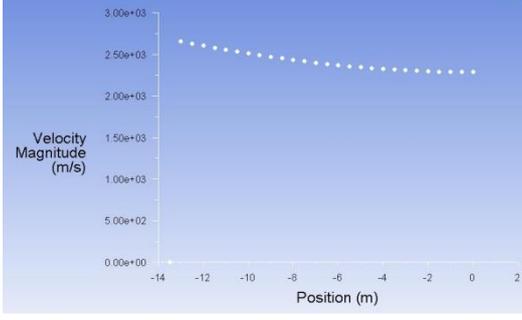
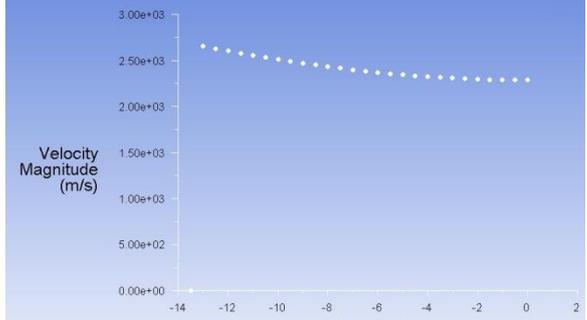
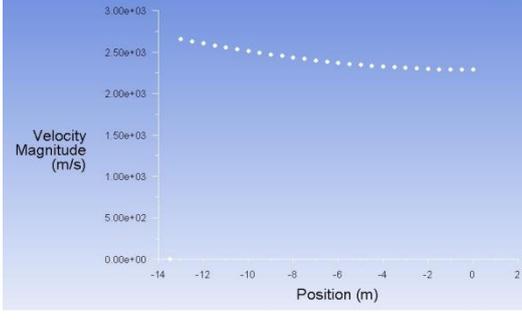
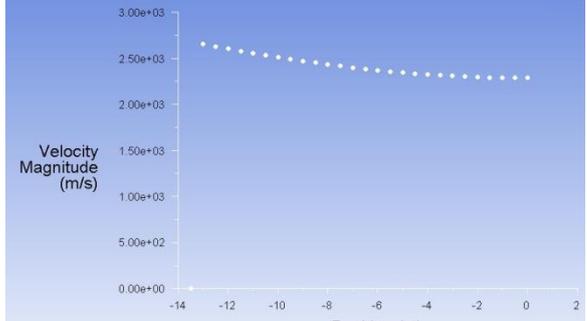
2500		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
		
	Давление 150 МПа	Давление 300 МПа
3000		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
		
	Давление 150 МПа	Давление 300 МПа

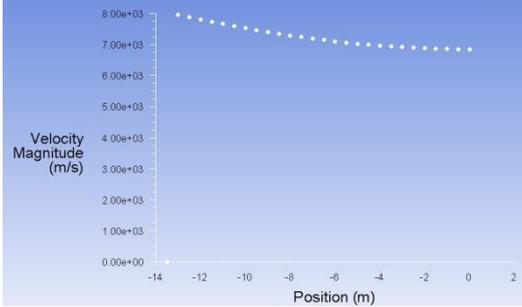
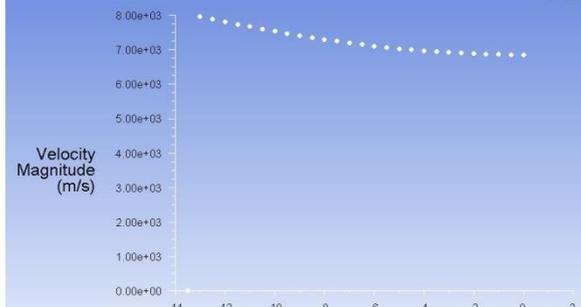
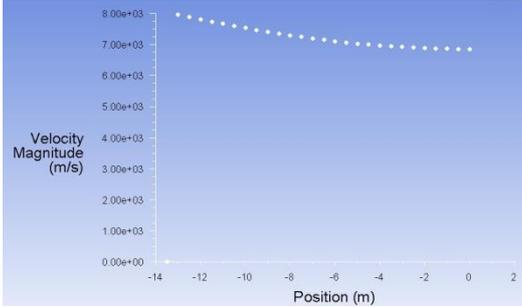
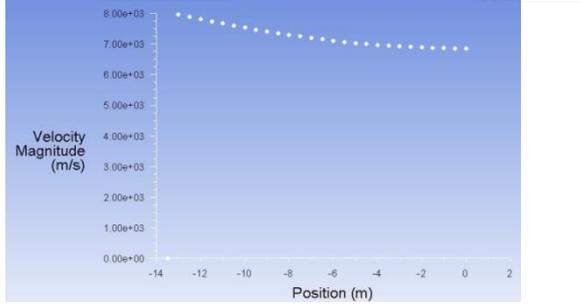
Таблица 2 – Профили скоростей в полисилконе.

Частота вращения В об/мин	Полисиликон распределение скоростей в зазоре	
500		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
		
	Давление 150 МПа	Давление 200 МПа
1000		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
		
	Давление 150 МПа	Давление 200 МПа

Продолжение 2

2000		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
	Давление 150 МПа	Давление 200 МПа
2500		
	Давление 1 МПа	Давление 50 МПа
	Давление 150 МПа	Давление 200 МПа

Продолжение таблицы 2

Частота вращения В об/мин	Полисиликон распределение скоростей в зазоре	
3000		
Давление 1 МПа		Давление 50 МПа
		
Давление 150 МПа		Давление 200 МПа

Приложение В

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ЗАВОД "УРАЛЭНЕРГОДЕТАЛЬ"**



« 14 » _____ октября _____ 2020 г.

**АКТ о промышленном внедрении результатов научно-исследовательской
работы**

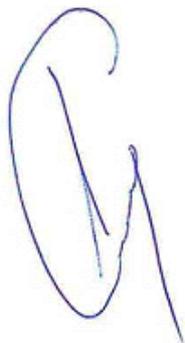
В рамках НИР «Разработка мероприятий по диагностике и увеличению ресурса металлургических машин» проведённых коллективом возглавляемым доцентом кафедры ГиГПС ЮУрГУ Редниковым Сергеем Николаевичем по диагностике и модернизации внутрицехового оборудования были проведены следующие виды работ:

1. Обследование ванн горячего цинкования с анализом остаточного ресурса футеровки оборудования;
2. Обследование тупиковых горелок цеха горячего цинкования без остановки производства;
3. Модернизация тупиковых горелок по результатам обследования и моделирования процессов работы с использованием авторской методики Редникова С.Н.;
4. Обследование и модернизация оборудования охлаждения оцинкованной проволоки ;
5. Обследование и модернизация оборудования отвода продуктов сгорания печей;
6. Обследование и модернизация оборудования автофреттирования.

В рамках НИР разработана конструкция тубы и рассекателя тупиковых горелок. Методика диагностики и настройки тупиковых горелок металлургических агрегатов внедрена в производство. Применение методики

позволило увеличить стойкость тубы и рассекателя горелки, выполненного из отечественного материала, с 3,5 месяцев непрерывной работы до 6 месяцев безаварийной эксплуатации. Предложенные мероприятия привели к снижению простоев оборудования на 9.7%. Получен экономический эффект от реализации предложенных мероприятий 15207103 руб.

Директор



О.В. Кузовлев



ИНН 667112410274, ОГРНИП 314667129000045
г. Екатеринбург, тел. +7 (343) 228-78-74, ул. Чайковского 11, оф. 415; www.hydro-test.ru

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа «Научное обоснование и реализация технических решений обеспечивающих повышение эффективности диагностирования металлургических машин» выполнена Редниковым Сергеем Николаевичем. Результаты диссертационной работы использованы в следующем виде:

В рамках НИР проведены работы по диагностике состояния элементов узла качания электрометаллургической печи 23-го цеха Первоуральского новотрубного завода (ОАО «ПНТЗ») с использованием разработанных Редниковым С.Н. методик оценки дефектов оборудования. Выявлены дефекты гидроцилиндра Hainzl, тип 256A2.6GA320200-1350D, материал №30611644, серийный номер №387808/2018, системы поворота электрометаллургической печи и произведена локализация дефекта расчётно аналитическим путём с использованием разработанного математического аппарата.

Произведён расчёт остаточного ресурса гидроцилиндра системы поворота электрометаллургической печи.

При внедрении результатов диссертационной работы получен следующий технический эффект:

разработанные методы диагностики элементов металлургических машин позволили сократить время диагностических мероприятий на 52%.

Прямой экономический эффект составил 4 913 728 руб. 13 коп.

Данный документ подтверждает научную и практическую значимость результатов НИР и не является основанием для финансовых претензий.

Диагностическая компания Гидро-Тест™
ИП Алексей Сергеевич Константинов
тел. +7 (343) 228-78-74
e-mail: info@hydro-test.ru



Акционерное общество «Первоуральский новотрубный завод»

623112, Россия, Свердловская область, г. Первоуральск, ул. Торговая, 1
ОКПО 00186619, ОГРН 1026601503840, ИНН/КПП 6625004271/997550001

+7 3439 27 77 77
chelpipe.ru



П Н Т З

От 27.07.2018 № 093

На № _____ от _____

Акт внедрения

Р

Разработки Редникова С.Н.: методика оценки химической стабильности рабочих жидкостей и смазочных материалов путем оценки диэлектрической проницаемости, оценка объемного распределения полей температур в элементах металлургических агрегатов с использованием системы тепловизионного контроля, позволяющие повысить эффективность первичной диагностики в целях обеспечения надежности и безопасной эксплуатации металлургического оборудования использованы в процессе подготовки специалистов АО «Первоуральский новотрубный завод». Использование методик диагностики позволяет обеспечить экономический эффект не менее 6 миллионов рублей в течении года за счёт уменьшения времени простоя оборудования.

Руководитель
Центра подготовки персонала



Handwritten signature of N.V. Pavlova

Н.В. Павлова



Общество с ограниченной ответственностью
«САН»

ИНН 6685020045, КПП 668501001, ОГРН 1126685027347,
Р/сч. 40702810162080000594
К/с 30101810900000000795
Банк ОАО УБРиР г.Екатеринбург., БИК 046577795

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

разработки Редникова Сергея Николаевича

«29» мая 2017г.

Разработка системы комплексной диагностики гидравлических приводов а именно комплексного снятия характеристик токового сигнала соленоидов, температурных полей объектов, пульсаций давления с целью определения остаточного ресурса технических объектов.

Преимущество разработки заключается в уменьшении времени диагностики и повышении достоверности полученных результатов, что позволило уменьшить складские запасы запчастей и уменьшило частоту внезапных отказов оборудования с двух месяцев до полугода без потери производительности оборудования. Мероприятия позволили достичь экономии финансовых средств в размере 4230 тыс. рублей.

Система диагностики промышленных гидравлических приводов на производстве показала высокую эффективность для определение КПД гидравлических насосов и прогнозирования поломки оборудования. Тем самым обеспечила уменьшение простоя станков и внезапных поломок оборудования. Принесла финансовую эффективность экономией средств и времени на её ремонт.

Технический директор _____ / Степанов А.С. /





Индивидуальный Предприниматель Константинов Алексей Сергеевич

ИНН 667112410274; ОГРНИП 314667129000045; БИК 046577674; Кор/сч 3010181050000000674

Р/сч 40802810616540007964 в Банке Уральский Банк ОАО "Сбербанк России" г. Екатеринбург
г. Екатеринбург, ул. Чайковского 11, оф. 415 (БЦ «Чайковский»)

Исх. №10/04/17-02 от 10 апреля 2017 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
Разработки Редникова Сергея Николаевича.

Настоящим подтверждаю: разработанная методика диагностики промышленных металлургических установок, а именно комплексного снятия характеристик токового сигнала соленоидов, температурных полей объектов, пульсаций давления (с целью определения остаточного ресурса технических объектов), была внедрена в производство.

Преимущество разработки заключается в уменьшении времени диагностики и повышении уровня достоверности полученных результатов, что позволило уменьшить складские запасы запчастей, а также уменьшило частоту внезапных отказов оборудования с двух месяцев до полугода, без потери производительности оборудования.

Данные мероприятия обеспечили экономию финансовых средств предприятия за весь период внедрения разработки.

С Уважением, КОМАН Групп

Константинов А.С.



Акционерное общество «Уральская Сталь»

ЛИСТОПРОКАТНЫЙ ЦЕХ № 1

ул.Заводская, д.1, г.Новотроицк, Оренбургская обл.,
Россия, 462353
Тел.: (35376) 6-70-00, 6-70-01

АКТ ИСПЫТАНИЯ

Разработка Редникова С.Н., а именно методика безразборного распознавания отказов и методика оценки остаточного ресурса элементов технологического оборудования с использованием комбинированного подхода была применена для оценки состояния гидравлических и электрических систем цехового оборудования.

Эта методика позволила своевременно выявить проблемные узлы и компоненты агрегатов, определить степень их износа, а так же неоптимальные режимы работы систем, ведущие к преждевременному износу. Полученные результаты обследования применили для планирования и подготовки ремонтов основного оборудования цеха, для своевременного заказа резервного оборудования.

Система диагностики позволяет уменьшить время нерегламентированных (аварийных) простоев, чем обеспечивает единовременный экономический эффект не менее 330 тысяч рублей (10% от стоимости часового простоя оборудования).

Так же возникает труднопрогнозируемый экономический эффект за счет закупки только минимально необходимого резерва оборудования, не закупая избыточного количества запасных частей.

Разработку считаем перспективной для использования на производстве.

Начальник ЛПЦ-1



А.И. Бедринов

27.04.2018

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

разработки к.т.н. Редникова Сергея Николаевича «Установка обработки материалов гидростатическим давлением»

«___» _____ Г

Разработка к.т.н. Редникова Сергея Николаевича «Установка обработки материалов гидростатическим давлением», а именно камера высокого давления и система двухступенчатого мультипликатора давления, использована в комплексе технологического оборудования производства экструдеров.

Преимущество разработки заключается в создании системы имеющей стоимость на 760 тыс. рублей меньшую, чем аналогичные по назначению конструкции, при сохранении требуемой производительности и режимов обработки.

Директор
ООО Инжиниринговая Компания «АМПРИ»,
к.т.н. Дурасов А.А.





ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
СЕВЕРСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД

ул. Вершинина, 7, г. Полевской,
Свердловская область, Россия, 623388
тел. +7 (34350) 3-21-01, факс +7 (34350) 3-41-97
e-mail: stw@stw.ru; www.tmk-group.ru

19.06.2014 № 125-14/1

На № _____ от _____

Акт внедрения.

Разработка Редникова Сергея Николаевича «Система комплексной диагностики гидравлических систем» используется в процессе обучения и повышения квалификации сотрудников Публичного Акционерного Общества «Северский трубный завод».

Начальник УР и ПП



Е.В. Пентегова

С.В. Селькова
8 34350 321 74



Частное учреждение дополнительного профессионального образования
Международный институт технических инноваций
International institute of technical innovations
620078, г. Екатеринбург, ул. Коминтерна 16, офис 412, тел. (343) 213-4-213,
e-mail: manager@iiti.ru, www: iiti.ru

Исх. №67/09 – 2015

По месту требования

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Системы диагностики, разработанные Редниковым Сергеем Николаевичем применяются в учебном процессе, а именно в рамках проведения курсов по теме: «Механическое оборудование металлургических заводов».

Директор УДПО «МИТИ» _____

(Н.С. Коршунова)

(подпись)

М.П.





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
(ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ))

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия, 454080,
Тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: info@susu.ru
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

№ _____

На № _____ от _____

Основные расчеты по научно-исследовательской работе к.т.н. доц. Редникова Сергея Николаевича, а именно компьютерное моделирование процессов протекающих в зазорах плунжерных пар, моделирование процессов протекающих в зазорах коаксиальных измерительных цилиндров вискозиметров, моделирование электродинамических процессов протекающих в магнитореологических жидкостях проведены с использованием лицензионного программного обеспечения ANSYS CFX и с использованием оборудования Суперкомпьютерного центра ЮУрГУ.

Проректор по информатизации

Л.Б. Соколинский

Бородулин К.В.
+7(351)267-90-06

083130



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

профессор., д.т.н., Д.В. Терентьев

« 12 » 01 2022 г.

АКТ

использования в учебном процессе

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы Редникова С.Н. на соискание учёной степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Редникова С.Н. «Развитие методологии диагностирования и разработка технических решений для повышения эффективности эксплуатации металлургических машин», выполненной на кафедре «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», внедрены в учебный процесс.

Разработанная методика первичного диагностирования оборудования используется при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» в учебной дисциплине «Контроль качества и диагностирование в машиностроении», магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при проведении занятий по учебной дисциплине «Надежность и диагностирование технологических систем», позволяет студентам получать практические навыки диагностирования технологических объектов при выполнении практических и лабораторных работ, а также при разработке и выполнении курсовых работ и ВКР.

Использование материалов диссертационной работы Редникова Сергея Николаевича позволяет производить анализ состояния силовых систем управления металлургического оборудования, что позволяет студентам, применять полученные знания при исследовании конструкций основного технологического оборудования систем теплозащиты и охлаждения.

Заведующий каф. МиТОДиМ,
д.т.н., профессор

С.И. Платов