

На правах рукописи



Перекрестов Аршавир Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ПОДВИЖНЫХ
СОПРЯЖЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
(НА ПРИМЕРЕ РАБОТЫ КОМПРЕССОРА В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ С
СЕРОВОДОРОДОМ)**

Специальность
05.02.04 - Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»).

Научный консультант **Войнов Кирилл Николаевич**

доктор технических наук, профессор,
академик Санкт-Петербургской
Инженерной Академии

Официальные оппоненты **Невшупа Роман Александрович**

доктор технических наук, научный сотрудник
Института строительных наук им. Эдуардо
Торроха Испанского высшего совета по научным
исследованиям

Валетов Вячеслав Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология приборостроения» ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий, механики и
оптики»

Озябкин Андрей Львович

доктор технических наук, профессор кафедры
«Транспортные машины и триботехника»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт машиноведения им.
А.А. Благонравова Российской Академии Наук

Защита диссертации состоится «__» _____ 20__ г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 в Институте проблем
машиноведения РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский
остров, Большой проспект, д. 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем
машиноведения РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский
остров, Большой проспект, д. 61 и на сайте <http://www.ipme.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
Д 002.075.01, доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Дубаренко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение износостойкости подвижных сопряжений компрессорного оборудования газоперерабатывающих заводов как ключевое направление для обеспечения надежной работы оборудования – одна из важнейших проблем настоящего времени, так как в практике используются в основном технические средства и смазочные материалы зарубежного производства. Все это удорожает добычу и переработку природного газа. Поэтому проблема надежности, экономичности и повышения срока службы газоперерабатывающего оборудования чрезвычайно актуальна.

Повышение эксплуатационных сроков газоперерабатывающих агрегатов (ГПА) может быть достигнуто путем применения соответствующих смазочных материалов и присадок к ним с высокими защитными свойствами, предохраняющими подвижные сопряжения компрессора от коррозии и износа. Большое значение для улучшения работы газоперекачивающих компрессоров имеет углубленное изучение технологии коррозионно-механического изнашивания цилиндропоршневых пар.

Наиболее эффективным способом снижения интенсивности коррозионно-механического изнашивания цилиндропоршневой группы (ЦПГ) компрессора является уменьшение содержания сероводорода и влаги, содержащихся в перекачиваемом газе. Для этого необходимо разработать и создать исследовательские установки для изучения процесса коррозионно-механического изнашивания, разработать соответствующие методики исследования и устройства для уменьшения содержания сероводорода и устранения возможности попадания продуктов конденсации природного газа в цилиндры компрессора.

Исследование влияния сероводорода на износостойкость узлов трения ГПА, изучение влияния антикоррозийных, противоизносных, антифрикционных присадок к маслам, используемых в парах трения ГПА, улучшающих смазочные свойства, создание новых противоизносных присадок, повышающих качество продукции, выпускаемой на газоперерабатывающих заводах (ГПЗ), имеет большое значение для увеличения срока службы компрессоров.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с НИОКР по темам: «Теоретические и экспериментальные исследования некоторых явлений, возникающих при контактах тел» (№ госрегистрации 01.20.0501723, 2004-2008 гг.), «Теоретические и экспериментальные исследования некоторых явлений, возникающих при сближении тел» (№ госрегистрации 01.20.0904642, 2009-2013 гг.), «Изучение явлений, возникающих при использовании магнитных смазочных материалов в узлах трения» (№ госрегистрации 114031870033, 2014 г.).

Объект исследования – трибосопряжения компрессорного оборудования и смазочные материалы, содержащие сероводород.

Предмет исследования – коррозионно-механическое изнашивание подвижных сопряжений газоперерабатывающих агрегатов.

Цель работы – исследование коррозионно-механического изнашивания металлических пар в сероводородсодержащих смазочных материалах и повышение износостойкости и надежности ответственных узлов трения компрессоров.

При этом решались следующие задачи:

1. Разработать и изготовить оборудование для испытания на изнашивание ответственных пар трения компрессора и создать методики проведения экспериментов.
2. Изучить процессы трения и изнашивания подвижных сопряжений компрессорного оборудования в сероводородсодержащих смазочных средах, чтобы устранить причины, снижающие надежность работы исследуемого оборудования.
3. Разработать для смазочных материалов, содержащих сероводород, композиции противоизносных присадок, предохраняющих сопряжения от быстрого изнашивания.
4. Исследовать воздействие коррозионных процессов на износостойкость трибосопряжений компрессорного оборудования.

5. Усовершенствовать коррозионно-механическую теорию изнашивания трущихся пар компрессорного оборудования с учетом воздействия магнитных противоизносных мицеллярных присадок в смазочной среде.
6. Разработать и внедрить технологию по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования.
7. Разработать магнитную противоизносную присадку в смазочные материалы и технологию ее производства.
8. Изучить взаимосвязь магнитной противоизносной присадки и физико-химических свойств смазочных материалов на эффективность влияния ее на надежность работы компрессора.

Методы исследования. Теоретическое и физическое моделирование, теория размерностей, выполнены лабораторные, стендовые и опытно-промышленные эксперименты на моделях и на натурных объектах, металлографические исследования, атомно-эмиссионный спектральный анализ, атомно-абсорбционный анализ.

Научная новизна:

1. Предложена и запатентована новая схема малогабаритного многоцилиндрового бесшатунного компрессора.
2. Разработан экспресс-метод исследования интенсивности изнашивания пар трения на базе атомно-абсорбционного анализа продуктов изнашивания.
3. Защищены патентами и изготовлены новые машины трения для исследования процесса изнашивания, трибометры для определения смазочных способностей углеводородных жидкостей. Запатентовано устройство для создания магнитного поля в зоне трения сопряженных поверхностей и разработаны (запатентованы) устройства для замера износа прецизионных деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей, создана методика по их применению.
4. Выявлена природа воздействия сероводорода, находящегося в газовой среде перекачиваемого природного газа, на поверхности трения, что использовано в разработке критерия коррозионной стойкости и уравнения для прогнозирования коррозионно-механического изнашивания ЦПГ компрессора в обобщенных триботехнических критериях подобия.
5. Теоретически проанализированы факторы, влияющие на изнашивание стенок цилиндра компрессора, получены математические зависимости в оболочке MathCad, описывающие процессы скорости развития коррозионно-механического изнашивания, а также изменения коэффициента трения.
6. Создана и запатентована противоизносная магнитная присадка на мицеллярной основе с использованием нанотехнологий, позволяющая заменить импортные смазочные материалы отечественными.

На защиту выносятся:

1. Разработанные испытательные установки для исследования процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в сероводород содержащих смазочных материалах.
2. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований влияния этаноламинов, влаги и сероводорода на процессы изнашивания цилиндропоршневой группы газоперекачивающих компрессоров с учетом разработки новых технологий.
3. Разработанное устройство для снижения вероятности попадания этаноламинов и влаги в цилиндропоршневую группу компрессора.
4. Результаты трибологических исследований противоизносных присадок и их композиций в составе отечественных смазочных масел.
5. Предложенные метод и устройства, предотвращающие аварийный выход из строя компрессора в результате «влажного» хода, а также схема привода многоцилиндрового бесшатунного компрессора.

6. Критериальное уравнение интенсивности изнашивания гильзы цилиндра, полученное на основе теории размерности для модели коррозионно-механического изнашивания подвижных сопряжений компрессоров, перекачивающих сероводород содержащий газ.

Достоверность полученных результатов и выводов в работе обеспечивается корректностью постановки задачи, соответствием теоретических и экспериментальных данных, подтверждены проведенными исследованиями в модельных и натурных условиях (на компрессоре КМ-2); результатами расчетов интенсивности изнашивания с помощью теорий моделирования и размерностей; при исследованиях изнашивания прецизионных деталей в лаборатории трения, изнашивания и надежности Центрального НИИ топливной аппаратуры (г. Санкт-Петербург).

Расчетно-теоретические исследования и обработка экспериментальных данных проводились с использованием современных лицензионных программных продуктов «Statistica», «Mathcad 14», «Microsoft Office Excel 2007».

Практическая значимость работы:

1. Разработаны и изготовлены, защищены авторскими свидетельствами машины трения, методика атомно-абсорбционного анализа для оценки интенсивности изнашивания конструкционных материалов.
2. Созданы и защищены авторскими свидетельствами трибометры для определения смазочной способности углеводородных сред.
3. Разработана и апробирована противоизносная магнитная присадка для дизельного топлива, что подтвердило ее высокие антифрикционные свойства.
4. Проведены испытания экспериментальных образцов смазочных материалов, позволяющие получить высокий экономический эффект при замене импортных масел отечественными.
5. Создана и запатентована технологическая цепочка по обеспечению безопасности работы компрессоров, перекачивающих природный газ.
6. Установлено отрицательное влияние малых количеств этаноламинов, попадающих в смазочную среду, на работоспособность пары трения «поршневое компрессионное уплотнительное кольцо – гильза цилиндра».

Апробация работы. Основное содержание исследований по мере их выполнения докладывалось и обсуждалось: на заседаниях кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «АГТУ», на заседаниях Ученого совета Института морских технологий, энергетики и транспорта ФГБОУ ВО «АГТУ»; на ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУ ВО «АГТУ» (2001-2016); на Всесоюзном техническом симпозиуме по уплотнительной технике (г. Сумы, 1985); на Всесоюзной конференции по компрессоростроению (г. Казань, 1986); на Всесоюзной конференции по вибрационной технике (г. Тбилиси, 1987); на Всесоюзной научно-технической конференции «Современные проблемы триботехнологии» (г. Николаев, 1988); на Всесоюзной конференции по компрессоростроению (г. Кишинев, 1988); на Всесоюзной научно-технической конференции «Стандартизации и пути повышения качества машиностроительной продукции для агропромышленного комплекса» (г. Бердянск, 1988); на XVI конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел» (г. Санкт-Петербург, 1998); на Славянтрибо-5. Наземная и аэрокосмическая трибология - 2000. Проблемы и достижения (г. Санкт-Петербург, 2000); на научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин» (г. Астрахань, 2002); на X юбилейном международном научном семинаре «Технологические проблемы прочности» (г. Подольск, 2003); на VIII Международной конференции из серии «Нелинейный мир» (г. Астрахань, 2004); на Международном научном семинаре «Технологические проблемы прочности» (г. Подольск, 2004); на XXV Российской школе по проблемам науки и технологий, посвященной 60-летию Победы (г. Екатеринбург, 2005); на VII-X Московском международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, 2008-2010); на научно-практической конференции «Математическая наука на Украине» (г. Киев, 2007);

на III Международной научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин» (г. Астрахань, 2007); на Научном семинаре по трению и износу в машинах им. М.М. Хрущева (г. Москва, 2007); на совещании-семинаре заведующих кафедрами теоретической механики Южного Федерального Округа (г. Новочеркасск, 2008); на XII Международном салоне промышленной собственности «Архимед-2009» (г. Москва, 2009); на совещании-семинаре заведующих кафедрами теоретической механики Южного Федерального Округа (г. Новочеркасск, 2009); на Международной научно-технической конференции «Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники» (г. Санкт-Петербург, 2010); на Всероссийском совещании-семинаре заведующих кафедрами и ведущих преподавателей теоретической механики вузов РФ (г. Новочеркасск, 2010); на VI Международном симпозиуме по трибофатике (г. Минск, 2010); на V сессии Научного совета РАН по механике деформируемого твердого тела (г. Астрахань, 2011); на XIII Международной конференции «Трибология и надежность» (г. Санкт-Петербург, 2013); на XIV Международной конференции «Трибология и надежность» (г. Санкт-Петербург, 2014); на VII Международном форуме по интеллектуальной собственности EXOPRIORITY-2015 (г. Москва, 2015); на XIV Всероссийской научно-технической конференции «Механика XXI века» (г. Братск, 2015).

Реализация работы. Результаты экспериментально-теоретических исследований внедрены на Астраханском газоперерабатывающем заводе («АКТ об использовании разработок, направленных на обеспечение безопасности и повышение износостойкости деталей компрессора КМ-2, эксплуатируемых в составе установки У-141, У-241»; «АКТ о внедрении результатов диссертационной работы»); на ОАО «Первомайский судоремонтный завод»; в ОАО «ЦНИТА» (г. Санкт-Петербург) имеется «ПРОТОКОЛ удовлетворительных испытаний противоизносной присадки для дизельного малосернистого топлива». На базе накопленного опыта созданы лабораторные работы по изучению изнашивания конструкционных материалов для магистров различных технических специальностей. Получены «Акт передачи научно-технической информации» от ОАО «ТАНЕКО» (Республика Татарстан, г. Нижнекамск), «Акт передачи научно-технической информации» от ОАО «ССЗ «Красные Баррикады» (пос. Красные Баррикады, Астраханская область). Результаты диссертации также нашли применение в учебном процессе на кафедре «Механика и инженерная графика» Астраханского государственного технического университета для магистрантов различных направлений и программ подготовки (18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии (Машины и аппараты химических производств), 23.04.02 Наземные транспортные системы, программа «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование»).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в монографии, а также в 58 печатных работах, в том числе 22 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 в изданиях из базы Scopus, 16 свидетельств Роспатента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, а также включает 4 приложения и список литературы из 456 наименований. Объем работы составляет 351 страница и включает 94 рисунка и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ причин выхода из строя подвижных сопряжений компрессоров, рассмотрены наиболее характерные виды коррозии и влияние механических факторов на надежность узлов трения оборудования, а также ассортимент компрессорного оборудования газоперерабатывающих заводов (ГПЗ).

Рассмотрена продукция различных зарубежных и отечественных производителей (РФ, США, Франция), состояния современного компрессорного оборудования ГПЗ. Установлено, что большую часть компрессорного парка ГПЗ составляют агрегаты импортного производства.

Как показали периодические обследования, проводимые на Астраханском ГПЗ в соответствии с ГОСТ 30479-97 «Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности», имеет место повышенный износ колец, ЦПГ (свыше 3 мм за 1000 часов работы) и гильз цилиндров. Это приводит к частым заменам деталей и остановкам компрессоров.

Таким образом, предельный износ стальных поршневых колец компрессора составляет 2,8...3,5 мм, предельный износ чугунных гильз цилиндров составляет 1,8...2,5 мм.

Анализ работы оборудования на ГПЗ, проведенный совместно с соответствующими службами ГПЗ, показал, что в период с 2004 по 2009 г.г. вследствие воздействия коррозионных составляющих газа было заменено около 17,5 тыс. узлов сальниковых уплотнений насосов, более 1,5 тыс. подшипников шатунной группы, около 1 тыс. колец сальников группы крейцкопфа компрессоров. На ремонтно-восстановительные работы только за три последних года потребовалось более 420 тыс. долларов США.

Отечественный и зарубежный опыт показал, что для повышения износостойкости подвижных сопряжений компрессорного оборудования необходимо использовать следующие методы:

- 1) применение высококачественных импортных масел, имеющих высокую стоимость;
- 2) введение в отечественные смазочные материалы новых противоизносных присадок, обеспечивающих повышение износостойкости трибосопряжений, а также ингибиторов коррозии, снижающих агрессивное воздействие сероводорода;
- 3) изменение технологической очистки газа от сероводорода с целью уменьшения его содержания в смазочном материале.

Выполнение научно-исследовательской работы по увеличению срока службы узлов трения компрессорного оборудования в смазочных материалах, содержащих сероводород, является важной технической задачей, решение которой имеет большое научное и практическое значение.

Во второй главе приводится описание разработанного и запатентованного экспериментального оборудования, представлены новые методики исследования коррозионно-механического изнашивания трибосопряжений компрессорного оборудования.

Для изучения процессов трения и изнашивания пары «поршневое кольцо-гильза цилиндра» в коррозионных средах и оценки эффективности присадок к смазочным материалам использовались различные машины трения. При исследованиях многокомпонентной среды на машине торцового трения применялись трущиеся образцы пальчикового типа.

Исследуемые образцы помещались в герметизированную камеру, в которой можно создавать различную газовую среду. В машине осуществляется подача и отбор использованной смазочной среды. Неподвижные образцы вырезались из запасных колец компрессора, подвижные – из стали 45 (ГОСТ 1050-88). Эксперименты выполнялись при скорости скольжения 2,07 и 3,06 м/с. В неподвижные образцы запрессованы вставки из химически чистого олова, играющие роль «индикаторов». При испытании на машине торцового трения использовался узел трения, состоящий из неподвижных образцов

цилиндрического типа диаметром 8 мм и длиной 16 мм и подвижного образца 2 диаметром 126 мм. Площадь трения – $5,02 \times 10^{-5} \text{ м}^2$; шероховатость $R_a = 0,20 \dots 0,25 \text{ мкм}$; коэффициент перекрытия – 0,0667. Температура в камере 50 °С, газовая среда – воздух, сероводород. Время испытаний – 6 ч.

Для уточнения параметров процесса коррозионно–механического изнашивания, кроме машины торцового трения, была создана и запатентована машина трения, которая предназначена для сравнительных испытаний в газовых средах при использовании различных масел и композиций присадок к ним. Конструкция машины и разработанная на базе атомно-абсорбционного анализа методика позволяет проводить ускоренные испытания на изнашивание металлических пар трения.

Испытываемый образец, выполненный в виде дискового эксцентрика, укреплен на ведущем валу и вращается с заданной угловой скоростью. Колодка поддерживается симметрично расположенными пружинами, предотвращающими ее перекося и заклинивание. При этом она имеет возможность поворачиваться в той же плоскости, что и образец таким образом, чтобы нормаль к поверхности колодки всегда совпадала с нормалью к поверхности подвижного образца, обеспечивая плотное прилегание поверхностей трения (образца и колодки).

Впервые получена возможность моделировать условия изнашивания поршневых колец в зависимости от снятых предварительно индикаторных диаграмм давления внутри цилиндра компрессора. При этом достигается повышение точности определения функциональной зависимости интенсивности изнашивания трущихся поверхностей от величины нормального давления и её временной характеристики в условиях как обычных, так и агрессивных сред. Машина трения позволяет определять коэффициент трения, а также динамику изнашивания образцов в зависимости от величины и формы цикла сил нормального давления.

Для испытания смазочных сред и материалов пар трения используется установка, которая состоит из машины трения, испытательной камеры, генератора агрессивных газов и вспомогательного технологического оборудования.

Различные методы исследования изнашивания цилиндропоршневой группы компрессора можно условно разделить на две группы: непосредственного замера износа деталей и косвенного замера. Было установлено, что одни способы дополняют другие.

Технологически износ образцов на установке для испытания в специальных углеводородных средах определялся методом спектрального анализа с последующей проверкой атомно-абсорбционным и рентгенофлуоресцентным анализами.

Определение износа проводилось косвенными методами по содержанию продуктов износа в отработанном смазочном материале.

Для этого отработанное масло периодически отбиралось для последующего анализа. В качестве исходной методики определения изнашивания была принята методика с использованием эмиссионного спектрального анализа.

Для локализации мест, в которых определялась скорость изнашивания сопряженных деталей, в них были установлены индикаторы износа из химически чистых элементов, не входящих в состав материала деталей.

Для проверки полученных результатов использовались атомно-абсорбционный и рентгенофлуоресцентный анализы, состоящие в следующем: из маслосборника масло вместе с продуктами износа отбиралось в колбу, и, если полученный объем составлял менее 50 мл, то до этого количества добавлялось чистое масло. Затем вся проба помещалась в фарфоровую чашку и после взвешивания помещалась в сушильный шкаф, где доводилась до постоянного веса при температуре 105...110 °С.

Озольнение проводилось в муфельной печи в следующих режимах при длительности в каждом 1 ч: 50 °С, 100 °С, 200 °С, 300 °С, 400 °С, 500 °С. Далее проводилось кислотное озольнение. Сухой остаток помещался в пробирку и добавлялось HNO_3 . Процесс озольнения происходил до исчезновения остатка (6...8 ч.). Оставшийся раствор растворяли в 10 мл

дистиллированной воды и вводили в атолизатор спектрофотометра «Хитахи 180-50». Полученные данные фиксировались на печатном устройстве.

Обработка проб рентгенофлуоресцентным методом проводилась в следующем порядке. В отобранную пробу масла добавлялся спектрально-чистый графитовый порошок в количестве 100 мг и после тщательного перемешивания масло подогревалось на электроплитке и сжигалось.

Полученный остаток прокаливался в муфельной печи при температуре не выше 823 ± 20 К. Прокаливание производилось в течение 1,5...2,0 ч. После прокаливании тигли охлаждались в эксикаторе до комнатной температуры. Затем остаток взвешивался на аналитических весах АДВ-200 и разбавлялся графитовым порошком до общей массы 100 мг.

После этого тщательно перетирался в агатовой ступке и перемешивался до получения однородного состава. На специально изготовленном прессе приготавливались образцы в виде таблеток. Износ определялся по концентрации в пробе. Для этой цели был использован рентгенофлуоресцентный сканирующий спектрометр VRA-30. Полученные данные фиксировались на печатающем устройстве.

Метод измерения основан на резонансном поглощении света свободными атомами элементов, возникающем при пропускании света через слой атомарного пара в графитовой кювете печи Массмана атомно-абсорбционного спектрометра «МГА-915».

При малых количествах определяемого элемента в пробе удобно пользоваться концентратором «Квант-2А-ГРГ», что позволяет сократить период работы машины трения для получения величины интенсивности изнашивания по данному элементу за исследуемый период.

Методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) анализируют содержание щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов (ТМ) в природных и питьевых водах, почвах, донных отложениях, растениях, в сырье и на различных этапах его технологической переработки, на последней стадии в виде товарной продукции и тому подобное. Кроме этого, металлы могут определяться и в сточных водах, подлежащих очистке или захоронению.

Проблема подготовки проб масла к атомно-абсорбционному спектральному анализу и собственно анализ уровней содержания металлов в этих пробах, характеризующих степень износа, относится к одной из важнейших в индикационной технологии.

Для определения металлов названным способом необходимо провести озоление пробы (т. е. освободить ее от органической матрицы).

Разложение проб масла производится либо способом сухой минерализации по п.3 ГОСТ 26929-94, либо способом мокрой минерализации по п. 4 ГОСТ 26929-94, либо с использованием СВЧ минерализатора типа «Минотавр-1».

Наиболее предпочтительным методом является мокрое озоление – озоление с помощью концентрированных кислот особой чистоты (ос.ч.) и пероксидом водорода (H_2O_2). При использовании этого метода не происходит потерь некоторого количества анализируемых элементов, что свойственно сухому озолению.

В нашем случае применяли смесь серной (H_2SO_4) и азотной кислот (HNO_3), которые легко вступают в реакции окисления.

После завершения разложения пробы и ее остывания раствор-концентратор, прошедший цикл минерализации, количественно переносится в аналитическую пробирку и доводится до метки бидистиллированной водой. Объемы (пробы и раствора концентрата) учитываются при окончательном расчете концентраций обнаруженных элементов.

В третьей главе рассмотрено технологическое влияние агрессивных сред различного состава и процесса коррозии на изнашивание подвижных трибосопряжений компрессорного оборудования в различных смазочных материалах.

Состав газов газоконденсатных месторождений после отделения конденсата близок к составу природного газа. Состав попутных нефтяных газов зависит от условий залегания нефти (температуры и давления) и от состава природного газа, отличается значительным содержанием этана, пропана, бутанов и высших углеводородов.

Астраханское газоконденсатное месторождение характеризуется аномально высоким содержанием коррозионно-активных компонентов: до 25% H_2S и до 20% CO_2 (табл. 1). Агрессивные составляющие перекачиваемого газа вызывают повышенную интенсивность изнашивания, в первую очередь поршневых колец и цилиндра компрессора. Собранные данные по эксплуатации компрессоров и изнашиванию деталей ЦПГ указывают на необходимость повышения их износостойкости. В зависимости от содержания агрессивных составляющих, главными из которых является сероводород и влага, возникают коррозионные процессы, приводящие к коррозионно-механическому изнашиванию деталей ЦПГ. Для прогнозирования износа ЦПГ необходимо контролировать и учитывать влияние изменения компонентного состава перекачиваемого природного газа.

Наиболее агрессивное воздействие сероводорода на уплотнительные кольца компрессора КМ-2 происходит во второй ступени, где давление изменяется от 3,1 МПа на всасывании до 6,7 МПа на нагнетании, при этом температура изменяется от 50 °С до 103 °С. Согласно с рекомендациями ВНИИГАЗа по коррозионной активности эта среда относится к среде с низким содержанием сероводорода от 0,0003 до 0,01%.

Таблица 1

Состав природных газов некоторых месторождений

Месторождение	Содержание, % об.							
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	H_2S	N_2
Лугинецкое (Томская область)	85,1	3,6	3,0	2,3	1,1	1,0	-	3,9
Тюменская область («сухой» газ)	98,6	0,1	-	-	-	0,2	-	1,1
Астраханское (газоконденсатное месторождение)	47...54	2,0...5,5	0,9...1,7	0,4...0,9	0,3...1,6	18...21	20...26	0,2
Ставрополь	98,8	0,3	0,2	0,1	-	0,2	-	0,4

Проводимые рядом авторов в начале 90-х годов исследования по замене импортных масел на одно из наиболее близких по физико-химическим свойствам отечественное масло ХС-40 показали, что, несмотря на его несомненную экономическую эффективность, смазочные и противоизносные свойства значительно уступают аналогичным свойствам масла Orites-270DS.

Исследования также показали, что масла Orites-270DS и ХС-40 обладают недостаточными противоизносными свойствами в присутствии сероводорода.

Основной проблемой работы поршневых компрессоров является достаточно быстрый выход из строя уплотнительных и маслосъемных колец поршневой группы, маслосъемных колец сальника штока крейцкопфа и шатунных подшипников.

Для изучения влияния различных факторов на изнашивание ЦПГ компрессоров, работающих в воздушной среде, а также содержащей сероводород H_2S , использовалась машина трения торцового типа, моделирующая изнашивание этой группы деталей. Предварительно масла проверялись на соответствие ГОСТ и ТУ: МС-20 – ГОСТ 21743-76, ХС-40 – ТУ 38901446-83, Orites-270DS – паспортным данным.

При работе узлов трения ЦПГ в воздушной среде смазочная способность масла Orites-270DS и ХС-40 мало различаются, что видно из табл. 2.

В табл. 3 показаны значения скорости изнашивания неподвижного образца в воздушной среде на испытательной машине торцового типа.

Таблица 2

Сравнительные характеристики испытуемых смазочных материалов

Смазочный материал	Критическое давление P_k , Н	Давление сваривания P_c , Н	Скорость износа W , мкм/ч
Orites-270DS	500	1100	0,0082
ХС-40	420	950	0,0087
МС-20	480	1095	0,0090

Таблица 3

Зависимость скорости изнашивания металлических пар в смазочных материалах от давления

Смазочный материал	Давление, МПа				
	0,5	1	2	3	4
	Скорость изнашивания, мкм/ч				
Orites270DS + воздух	0,0028	0,0054	0,0087	0,0108	0,0130
XC-40 + воздух	0,0032	0,0060	0,0098	0,0104	0,0142
MC-20 + воздух	0,0038	0,0064	0,0091	0,0114	0,0146

На Астраханском газоперерабатывающем заводе в качестве абсорбента используются водные растворы МЭА и ДЭА. Массовая доля этаноламинов в водном растворе составляет 33%. При попадании в цилиндр компрессора малых количеств жидкости в виде пены это вызывает разжижение масляной пленки, разделяющей трущиеся детали ЦПГ. Это вызывает рост интенсивности изнашивания трущихся пар в зависимости от вида и характера попавших в перекачиваемый газ веществ.

Наибольшее практическое применение в процессах переработки и очистки газа от H_2S и CO_2 получили МЭА и ДЭА. Последний особенно целесообразен в тех случаях, когда в исходном газе наряду с H_2S и CO_2 содержатся COS и CS_2 , которые вступают в необратимую реакцию с МЭА, вызывая его значительные потери.

При сравнении воздействия малых концентраций раствора МЭА и ДЭА, попадающих в смазку в виде пены, ДЭА оказывает более отрицательное воздействие (рис. 1 и рис. 2). Это объясняется тем, что в отличие от МЭА, ДЭА более активно растворяет COS и CS_2 .

Анализ результатов испытаний (рис. 2) показал, что скорость изнашивания увеличивается пропорционально концентрации ДЭА в смазочной среде, так как МЭА и ДЭА в основном уменьшают вязкость смазки и адсорбцию слоев пленки на поверхности металла.

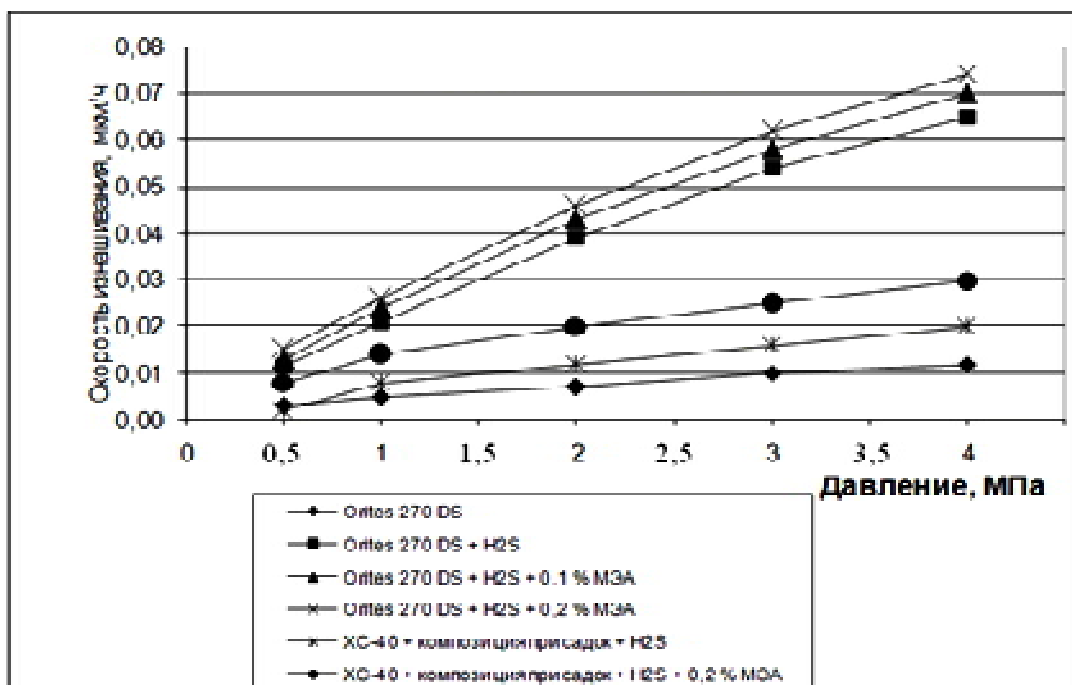


Рисунок 1 – Изменение скорости коррозионно-механического изнашивания подвижных сопряжений от давления в присутствии МЭА

Анализ результатов испытаний свидетельствует о том, что наименьшая скорость изнашивания образцов наблюдается при работе в масле Orites-270DS в воздушной среде. При наличии в ней сероводорода скорость изнашивания резко увеличивается и растет с

повышением давления. Это объясняется коррозионным воздействием сероводорода на поверхности трения.

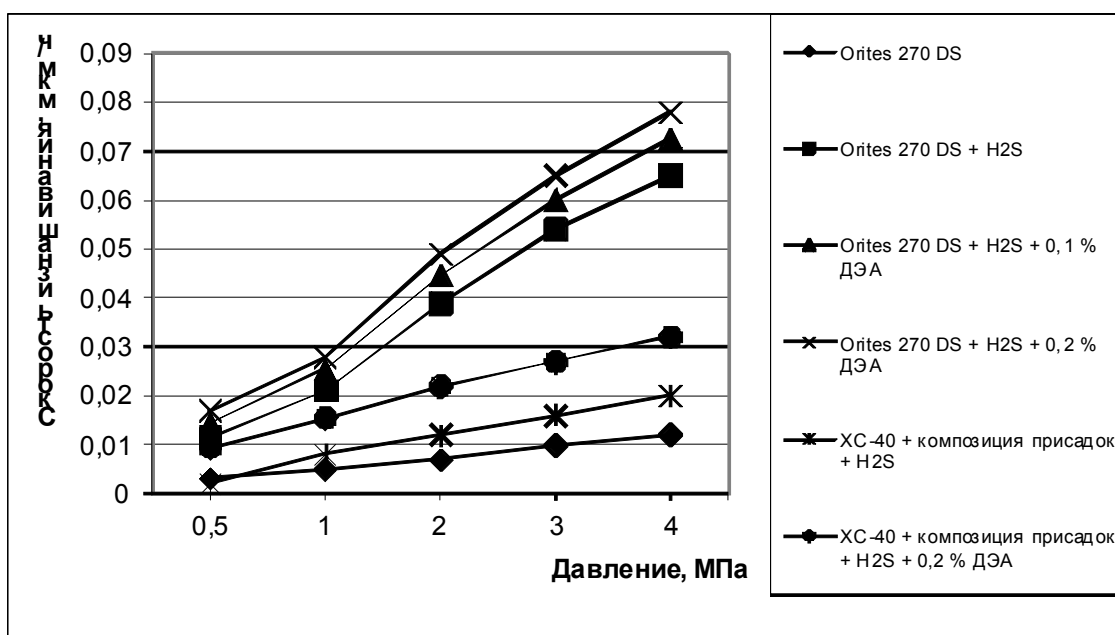


Рисунок 2 – Влияние сероводорода и ДЭА на скорость коррозионно-механического изнашивания металлических пар

Для выяснения зависимости влияния содержания этаноламинов в смазочном материале на скорость изнашивания образцов провели испытания процессов трения и изнашивания при их содержании 0,1% масс. (рис. 3), при этом скорость изнашивания увеличилась примерно в два раза. Это связано с тем, что этаноламины, абсорбируя сероводород, подводят его к поверхностям трения, увеличивая его концентрацию в зоне трения поверхностей и, тем самым, усиливая коррозионно-механическое изнашивание.

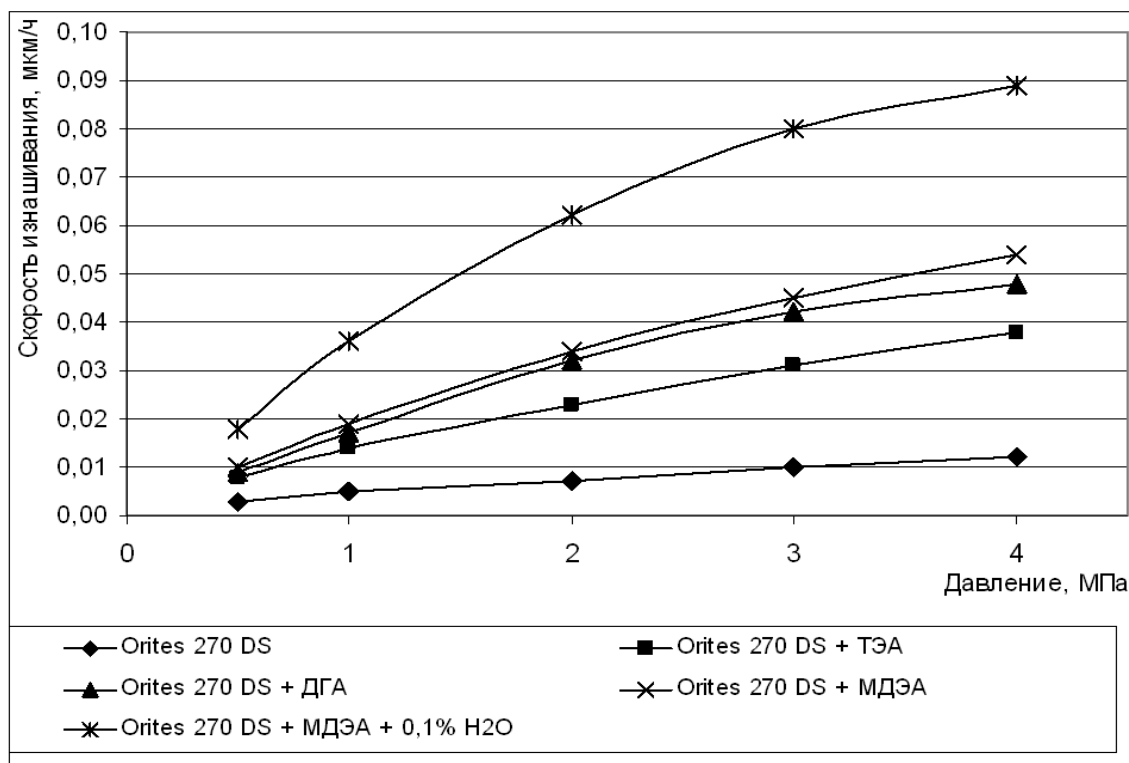


Рисунок 3 – Изменение скорости коррозионно-механического изнашивания металлических пар при содержании этаноламинов 0,1% масс

Сравнивая воздействие этаноламинов в составе масла Orites 270 DS (рис. 3) и XC-40 (рис. 4), видно, что их воздействие на скорость изнашивания образцов при использовании масла XC-40 с композицией присадок в 2,5 раза меньше, чем при использовании масла Orites 270 DS.

Расчётный анализ компонентов газа на входе первой ступени компрессора (табл. 4) показывает, что при содержании водяных паров 1% при температуре 49,7 °С начинается конденсация водяных паров, а при содержании водяных паров 0,1% при температурах 31,3...34,7 °С начинается конденсация отдельных углеводородов.

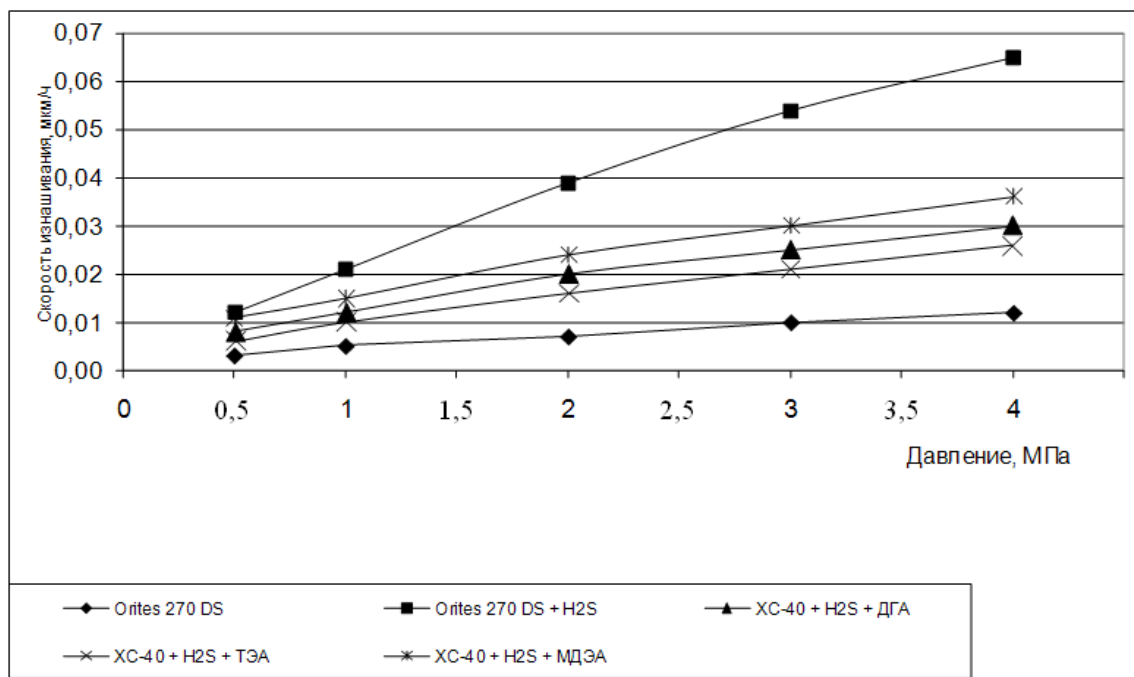


Рисунок 4 – Зависимость скорости коррозионно-механического изнашивания образцов при содержании этаноламинов 0,2% масс

Таблица 4

Компонентный состав газа на всасывании первой ступени компрессора

№	Компонент	Компонентный состав, % об.				
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5
1	H ₂ O	0,1	0,1	1,0	0,1	1,0
2	H ₂ S	0,3	0,06	0,06	0,05	0,05
3	CO ₂	2,4	1,01	1,01	1,1	1,1
4	N ₂	1,4	0,71	0,71	0,64	0,64
5	C ₁	73,49	74,64	73,74	77,66	76,76
6	C ₂	6,89	9,00	9,00	7,05	7,05
7	C ₃	7,92	8,8	8,8	7,44	7,44
8	C ₄	5,5	3,63	3,63	3,07	3,07
9	C ₅	1,2	1,03	1,03	1,52	1,52
10	C ₆	0,2	0,42	0,42	0,77	0,77

Установлено, что причиной аварий вследствие поломки штока компрессора являются гидроудары из-за попадания конденсата паров воды и углеводородов при снижении температуры потока во всасывающем трубопроводе первой ступени компрессора.

Снижение температуры газа во всасывающем трубопроводе компрессора первой и второй ступени приводит к конденсации паров воды и отдельных компонентов газовой смеси на внутренней поверхности труб. Поэтому необходимо ввести ограничение по нижнему пределу температуры газа на всасывании первой и второй ступени. В случае необходимости ввести подогрев потока газа после сепараторов на 3...5 °С.

На машине трения были проведены испытания коррозионно-механического изнашивания пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» в агрессивной газовой среде, содержащей сероводород и влагу, при различной температуре (материал подвижного образца – сталь 12Х18Н10Т, материал неподвижного образца – чугун АЧС-3, при давлении 1 МПа, смазочный материал – масло МС-20, время проведения эксперимента – 12 ч).

Результаты исследований представлены на рис. 5, 6, из которых видно, что интенсивность коррозионно-механического изнашивания непрерывно возрастает по мере увеличения концентрации влаги и сероводорода в испытательной камере.

В результате воздействия сероводорода в присутствии паров жидкости, образцы подверглись коррозии поверхностного слоя, несмотря на то, что они изнашивались в течение 12 ч.

Наступающее в результате присутствия сероводорода снижение антифрикционных и противоизносных свойств смазочных масел ведет к нарушению режима работы агрегатов и аварийным остановкам.

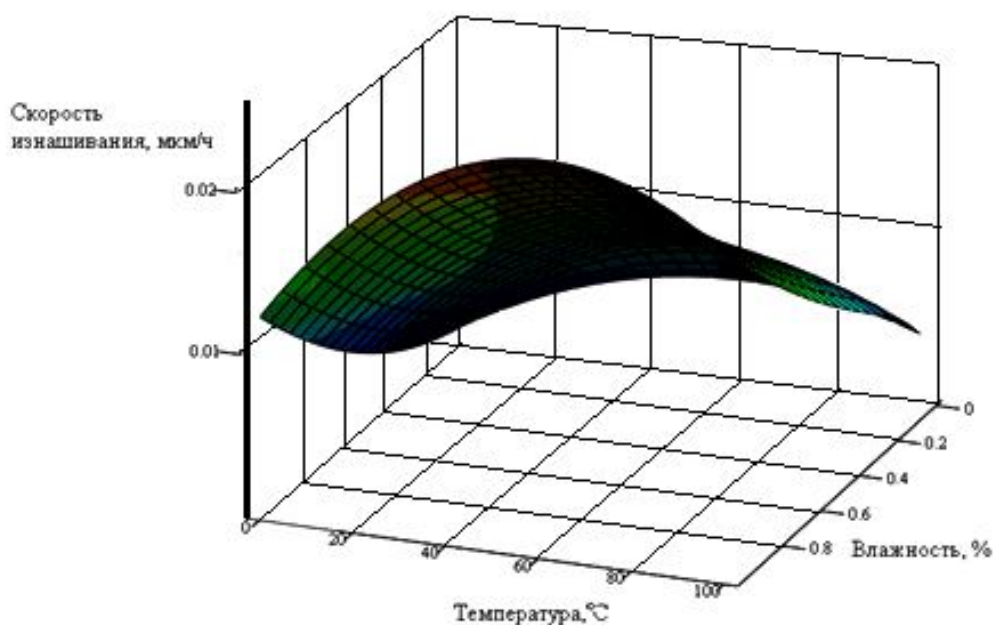


Рисунок 5 – Скорость изнашивания образцов в зависимости от температуры и содержания влаги

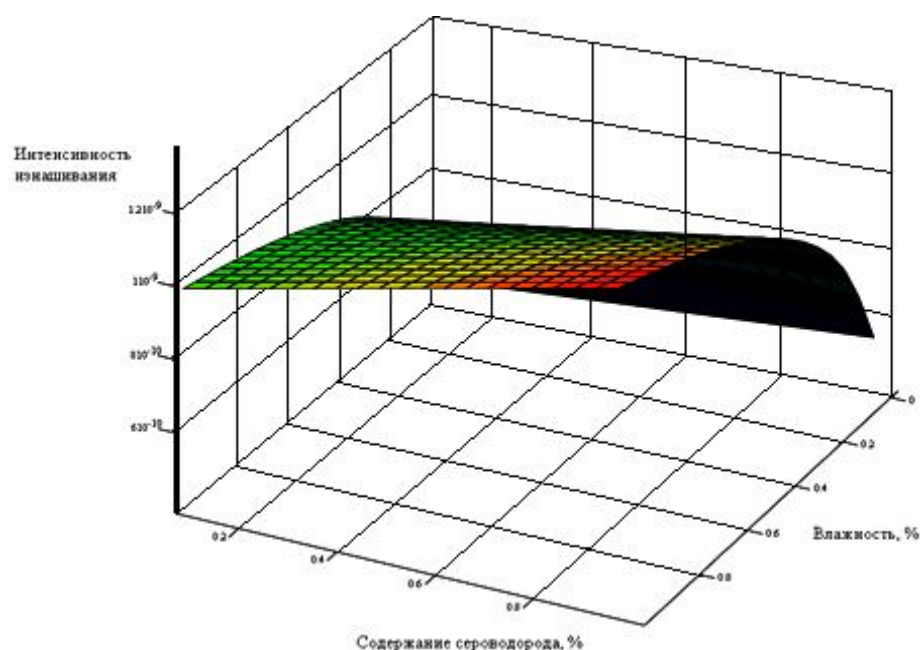


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности изнашивания образцов от содержания сероводорода и влаги в перекачиваемом газе

Изменение направления скорости движения поршня в мертвых точках затрудняет образование смазочного слоя гидродинамической природы, так как скорость относительного движения деталей в местах максимального износа близка к 0. С учетом данных для расчета коэффициента трения скольжения, полученных Ю.Н. Дроздовым, уравнение для определения коэффициента трения скольжения ЦПГ компрессора, перекачивающего агрессивный природный газ, будет иметь вид:

$$f = 0,021 \lg \frac{P \cdot H \cdot B}{\mu \cdot V_m \cdot R_{np} \cdot E_{np}} + 0,14,$$

где P – давление, МПа; HB – твердость материала втулки по Бринеллю, МПа; μ – динамическая вязкость масла, Па*с; V_m – скорость поршня вблизи верхней мертвой точки, м/с; R_{np} – приведенный радиус кривизны, м; E_{np} – приведенный модуль упругости для поршневого кольца и цилиндрической втулки.

Давление и температура внутри цилиндра поршневого компрессора при сжатии газа взаимосвязаны и определяются уравнением, полученным П.И. Пластининым:

$$T_H = T_{BC} \left(\frac{P_H}{P_{BC}} \right)^{\frac{K_T - 1}{K_T}},$$

где T_H – температура нагнетания, °С; T_{BC} – температура всасывания, °С; P_H – давление нагнетания, МПа; P_{BC} – давление всасывания, МПа; K_T – коэффициент в показателе политропы.

Оценим коэффициент трения в области цилиндрической втулки вблизи верхней мертвой точки, соответствующей углу поворота кривошипа 5°. Основное отличие смазочной среды компрессора, перекачивающего природный газ, является попадание пузырьков пены из абсорбера, особенно, при технологическом сбое системы очистки газа. В данном случае, согласно Е. Manegold, в смазочной среде присутствует газовая эмульсия, в которой пузырьки газа имеют шарообразную форму. Пузырьки, попавшие в смазочную пленку, участвуя в качестве смазочной среды, согласно принципу Ле Шателье, еще более уменьшаются вследствие увеличения внешнего давления. С другой стороны, вследствие вскипания жидкости стенки пузырьков разрываются, и газ внутри пузырьков переходит в перекачиваемый газ. При этом происходит сближение трущихся поверхностей с изменением коэффициента трения и интенсивности изнашивания в большую сторону. Одновременно с увеличением давления на единичном контакте за счет выделившегося из разрушенной пленки пузырька сероводорода происходит коррозия на поверхности единичного контакта.

При граничном трении для металлов, смазываемых углеводородными жидкостями, по Б.В. Дерягину, В.П. Лазареву, выполняется биномиальный закон трения. Многочисленные эксперименты, проведенные N. Gane и J. Skinner, показали рост сдвигового сопротивления от нормального давления по биномиальному закону.

В работе экспериментально получены зависимости коэффициента трения от давления и температуры в зоне трения в среде различных смазочных материалов (МС-20, ХС-40, Orates-270DS). На рис. 7 представлена графическая зависимость коэффициента трения от давления в трибосопрежении при температуре $T = 95$ °С, что соответствует параметрам работы ЦПГ вблизи верхней мертвой точки гильзы цилиндра компрессора. Из данных, представленных на рис. 7, видно, что коэффициент трения имеет максимальные значения при экстремальных условиях проведения эксперимента ($P = 4$ МПа, $T = 95$ °С), которые характерны для процесса нагнетания в цилиндре компрессора КМ-2.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента трения от изменения температуры в зоне трения при давлении $P = 4$ МПа. Как видно из полученных результатов, влияние температуры на изменения коэффициента трения скольжения оказывается существеннее изменения давления в паре трения в 3...4 раза.

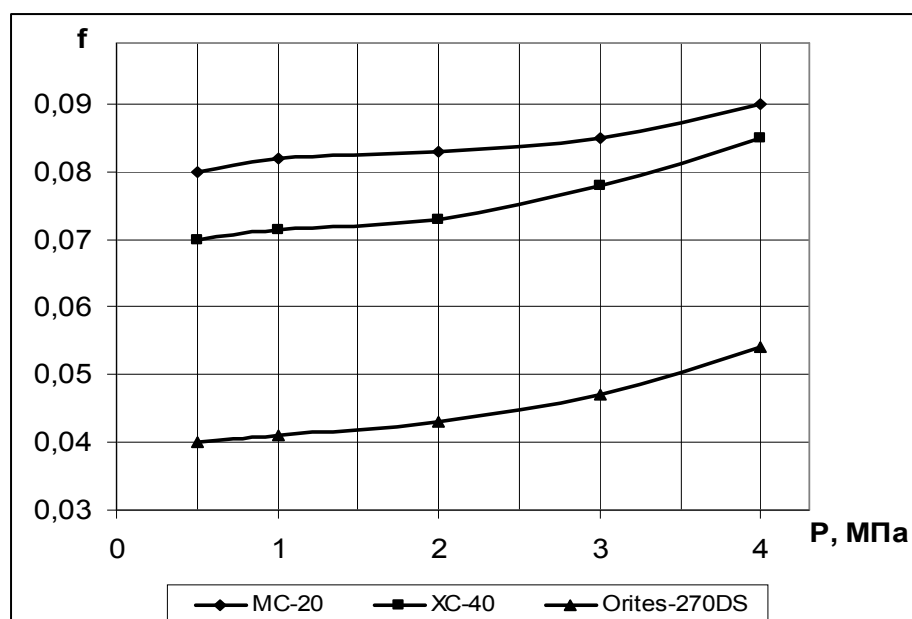


Рисунок 7 – Изменение коэффициента трения металлических пар от давления при температуре $T = 95\text{ °C}$ в смазочных материалах

Так как коэффициент трения является энергетической характеристикой, показывающей диссипацию энергии в окружающее пространство, то уменьшение его значения характеризует повышение энтропии процессов. Для применяемых смазочных материалов коэффициент трения необходимо снижать, что способствует уменьшению потерь энергии при работе машин и механизмов.

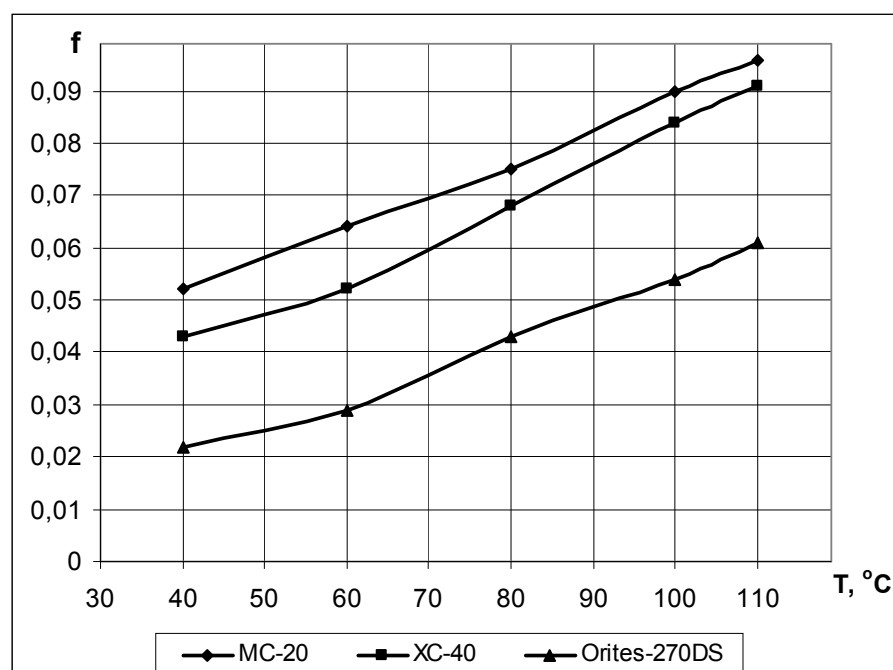


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения подвижных сопряжений от температуры

При одновременном протекании процессов изнашивания и коррозии наибольшая величина коэффициента трения имеет место, когда интенсивность изнашивания и скорость коррозии металлических пар примерно одинаковы (рис. 9).

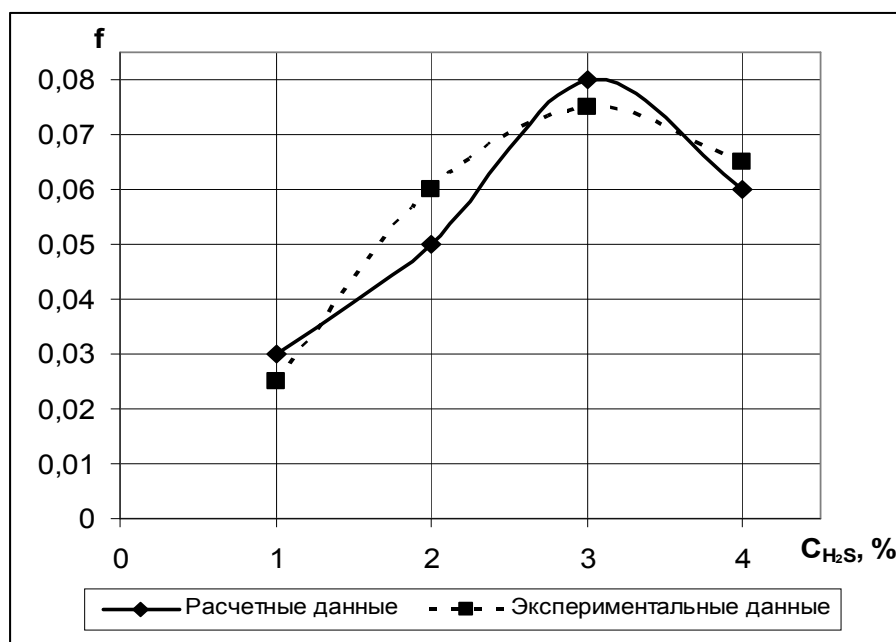


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента трения от содержания сероводорода в смазочной пленке

Проведем анализ полученных данных с помощью нелинейной аппроксимации. Для рис. 9 чётное число точек наблюдения: $n = 4$, шаг наблюдения по оси x : $h = 1$. Коэффициент трения $f = 0,03; 0,05; 0,08; 0,06$. Нелинейную аппроксимацию выполним с использованием полинома второй степени (параболы), используя компьютерную оболочку MathCad (рис. 10).

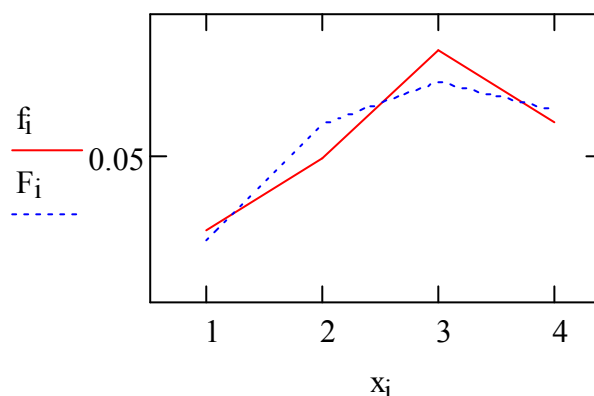


Рисунок 10 – Нелинейная аппроксимация экспериментальных данных

Из рис. 9 видно, что расчетные значения совпадают с экспериментальными, при этом средняя погрешность составляет 12%.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию смазочных материалов с различными физико-химическими свойствами на процессы трения и изнашивания трибосопряжений.

Одним из перспективных направлений, связанных с повышением износостойкости газоперекачивающего оборудования, является разработка и создание новых смазочных материалов для работы трибосопряжений в сероводородсодержащей среде. Поэтому необходимы исследования новых присадок, позволяющих повысить износостойкость узлов трения.

Полученные данные на установке УТ-1 показывают, что масла Orites-270DS и ХС-40 обладают недостаточными противоизносными свойствами в присутствии сероводорода. Скорость изнашивания в масле, насыщенном сероводородом, достигает чрезвычайно высоких значений: при давлении 2,0 МПа – 0,038 мкм/ч; 0,0426 мкм/ч; при давлении 4,0 МПа – 0,06 мкм/ч; 0,0736 мкм/ч. В работе выполнены исследования по улучшению

свойств масла ХС-40 через подбор смазочной композиции, которая была бы устойчивой к воздействию сероводородсодержащего газа и при этом не ухудшала физико-химические характеристики.

Состав композиций присадок, в которых использованы ингибиторы коррозии, снижающие сероводородное воздействие на трущиеся поверхности, приведены в табл. 5-8.

Таблица 5

Компонент композиции	Состав композиций присадок, масс. %						
	1	2	3	4	5	6	7
ИФХАНГАЗ-1	33	50	67	33	50	67	50
ФОМ-9	-	-	-	-	-	-	50
Д-4	67	50	33	-	-	-	-
Д-5	-	-	-	67	50	33	-

Таблица 6

Влияние композиций присадок на скорость изнашивания экспериментальных образцов в газовой среде при смазке маслом ХС-40 (давление газовой среды 0,1 МПа)

Композиция	Состав композиции	Процентное содержание компонентов	Скорость изнашивания, мкм/ч		
			Давление в зоне трения образцов, МПа		
			1	2	4
1	ИФХАНГАЗ-1 Д-4	33 67	0,022	0,038	0,064
2	ИФХАНГАЗ-1 Д-4	50 50	0,018	0,035	0,058
3	ИФХАНГАЗ-1 Д-4	67 33	0,017	0,028	0,056
4	ИФХАНГАЗ-1 Д-5	33 67	0,017	0,034	0,063
5	ИФХАНГАЗ-1 Д-5	50 50	0,018	0,032	0,053
6	ИФХАНГАЗ-1 Д-5	67 33	0,018	0,032	0,054
7	ИФХАНГАЗ-1 ФОМ-9	50 50	0,018	0,035	0,058

Таблица 7

Компонент композиции	Состав присадок композиций, масс. %											
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ИФХАНГАЗ-1	50	75	50	-	-	-	20	20	40	40	40	-
Бетол-1	-	-	-	50	-	-	20	40	20	20	-	5
Викор-1	-	-	-	-	50	50	-	-	-	-	20	-
ОТП	25	-	25	25	25	25	40	20	20	-	20	-
АДА	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45
ПАФ-4	-	25	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-
Трибокор-М	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	50
Фриктол-1	25	-	-	25	25	-	20	20	20	20	20	-
ДФБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-

Проведенные исследования влияния ингибиторов коррозии показали, что скорость коррозионно-механического изнашивания испытуемых образцов снижается. Для дальнейшего снижения скорости изнашивания трущихся деталей необходимо вводить в масла противоизносные присадки. При исследовании влияния композиций присадок №8-19 в масле Orites-270DS выявлено, что скорость коррозионно-механического изнашивания испытуемых образцов также снижается. Зависимости изменения скорости изнашивания испытуемых образцов от давления при введении композиций присадок №8-19 для масла ХС-40 показывают, что наилучшие свойства имеет композиция присадок №19.

Таблица 8

Влияние композиций присадок на скорость изнашивания экспериментальных образцов в газовой среде при смазке маслом ХС-40 (давление газовой среды 0,1 МПа)

Композиция	Состав композиции	Процентное содержание компонентов	Скорость изнашивания, мкм/ч		
			Давление в зоне трения образцов, МПа		
			1	2	4
8	ИФХАНГАЗ-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	50 25 25	0,019	0,028	0,048
9	ИФХАНГАЗ-1 ПАФ-4	75 25	0,023	0,036	0,056
10	ИФХАНГАЗ-1 ОТП ТРИБОКОР-М	50 25 25	0,027	0,029	0,048
11	БЕТОЛ-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	50 25 25	0,019	0,030	0,049
12	ВИКОР-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	50 25 25	0,018	0,029	0,048
13	ВИКОР-1 ОТП ПАФ-4	50 25 25	0,019	0,027	0,053
14	ИФХАНГАЗ-1 БЕТОЛ-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	20 20 40 20	0,024	0,028	0,049
15	ИФХАНГАЗ-1 БЕТОЛ-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	20 40 20 20	0,022	0,034	0,054
16	ИФХАНГАЗ-1 БЕТОЛ-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	40 20 20 20	0,018	0,027	0,043
17	ИФХАНГАЗ-1 БЕТОЛ-1 ФРИКТОЛ-1 ДФБ	40 20 20 20	0,023	0,034	0,055
18	ИФХАНГАЗ-1 ВИКОР-1 ОТП ФРИКТОЛ-1	40 20 20 20	0,018	0,027	0,044
19	БЕТОЛ-1 АДА ТРИБОКОР-М	5 45 50	0,008	0,023	0,039

Наиболее эффективный результат из всех исследуемых композиций присадок, снижающих коррозионно-механическое изнашивание образцов, показала композиция присадок №19. Таким образом, в результате механохимической (трибохимической), электрохимической и химической активации «пакета» композиций присадок №19 в зоне трения, процессов адсорбции, хемосорбции и триботермодеструкции происходит внедрение в поверхностные слои молибдена, легирующего трущиеся поверхностные слои, изменяющие его структуру и микрогеометрию, что подтверждается исследованиями О.П. Паренаго, В.Н. Бакунина, Г.Н. Кузьминой. Атомы молибдена способны образовывать слоистые структуры, препятствующие образованию микротрещин, возникновению коррозионной усталости, а также растрескиванию и фреттинг-коррозии, что также отмечено в работах О.П. Паренаго.

Пятая глава посвящена исследованию свойств и применению магнитных жидкостей (МЖ), в частности, разработанной и запатентованной противоизносной магнитной присадки на мицеллярной основе.

Применение противоизносной магнитной присадки с использованием нанотехнологий дает возможность получить смазочный материал, обладающий металлоплакирующим эффектом.

Противоизносная магнитная присадка нового поколения представляет собой мицеллы на основе молекул твердой пластичной смазки оксида железа (Fe_3O_4) с окружающими ее молекулами олеиновой кислоты ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$), применение которой приводит к повышению смазочной способности дизельного топлива.

Присадка представляет собой жидкость на основе олеиновой кислоты с добавленными в нее мицеллами, включающими в себя оксид железа. Молекулы олеиновой кислоты адсорбируются на поверхности магнетита в результате процесса хемосорбции. Оксид железа, входящий в мицеллу, характеризуется низким сопротивлением сдвигу, что ведет к снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания подвижных сопряжений. Молекулы олеиновой кислоты, входящие в состав мицелл, предотвращают их слипание и дают возможность их нахождения во взвешенном состоянии в жидкости. Оксид железа Fe_3O_4 (магнетит) имеет характеристику: молекулярная масса 231,54; цвет – темно-красный; плотность 5,11 г/см³. Олеиновая кислота $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ представляет собой бесцветную жидкость с температурой кипения 286 °С, плотностью 0,9 г/см³. Длина молекулы олеиновой кислоты 2 нм. Средняя величина мицеллы составляет 10 нм. Намагниченность насыщения порядка 10 кА/м. Присадка предназначена для работы в слабых магнитных полях $\xi \ll 1$, где ξ - функция Ланжевена $L(\xi)$ с напряженностью магнитного поля 20...40 кА/м. Основа мицеллы представляет собой молекулы пластичной смазки оксида железа, а окружающие молекулы являются олеиновой кислотой с содержанием веществ в присадке, масс. %: Fe_3O_4 – 0,00001, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ – 0,0001, дизельное топливо – до 100.

Модель образующихся мицелл показана на рис. 11, а. При мицеллообразовании в углеводородных средах образуются мицеллы с противоположной ориентацией молекул ПАВ (рис. 11, б).

С ростом содержания ПАВ в растворе при $C_0 > \text{ККМ}$ (критическая концентрация мицеллообразования, C_0 – общая концентрация ПАВ в системе) наряду с увеличением концентрации сферических мицелл постепенно происходит изменение их формы (сферические мицеллы превращаются в анизометричные, а затем в ленточные, пластинчатые мицеллы, в которых углеводородные цепи располагаются параллельно друг другу).

На рис. 12 показана модель образования мицеллярных слоев, состоящих из сферических мицелл, так называемых мицелл Гартли-Ребиндера, которые с ростом содержания ПАВ перешли в цепные пластинчатые структуры.

Таким образом, появляется возможность снизить коэффициент трения скольжения в паре «гильза цилиндра – поршневое кольцо» за счет применения магнитной противоизносной мицеллярной присадки в составе смазочных масел. Частицы присадки под воздействием внешнего магнитного поля заданных параметров образуют на поверхности

трения несколько дополнительных слоев, улучшающих условия трения при граничном режиме смазки. В соответствии с этим достигается снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания трущихся пар.

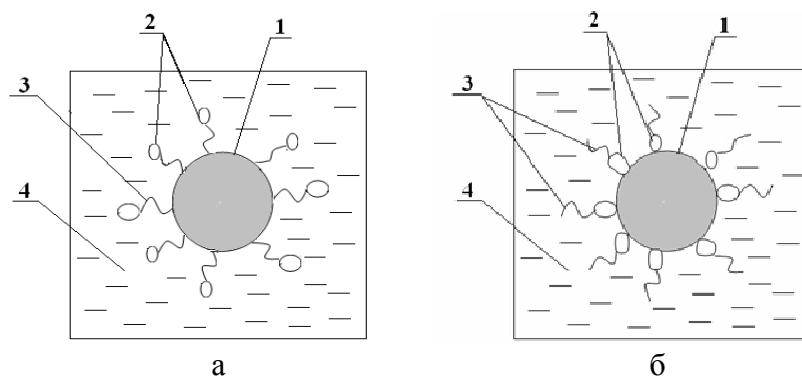


Рисунок 11 – Модель магнитной жидкости:

- а – прямая мицелла: 1 – ядро мицеллы; 2 – полярные группы; 3 – углеводородные радикалы; 4 – несущая жидкость (водосодержащая среда);
б – обратная мицелла: 1 – ядро мицеллы; 2 – полярные группы; 3 – углеводородные радикалы; 4 – несущая жидкость (углеводородная среда).

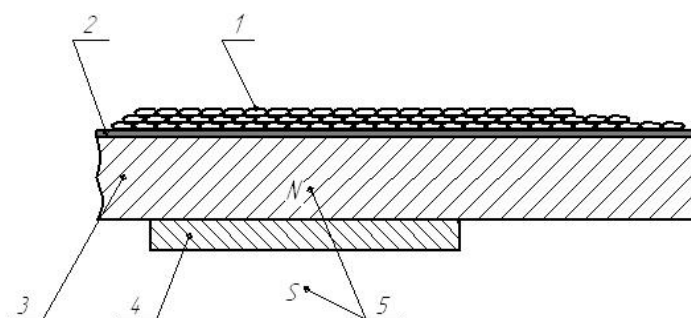


Рисунок 12 – Вид граничного слоя смазки на поверхности гильзы цилиндра в области верхней мертвой точки:

- 1 – мицеллярный слой магнитной противоизносной присадки; 2 – слой граничной смазки углеводородной природы; 3 – гильза цилиндра; 4 – постоянный магнит; 5 – расположение полюсов постоянного магнита

При лабораторных испытаниях на приборе HFRR дизельного топлива, приготовленного с введением в него присадки, получены следующие результаты (табл. 9).

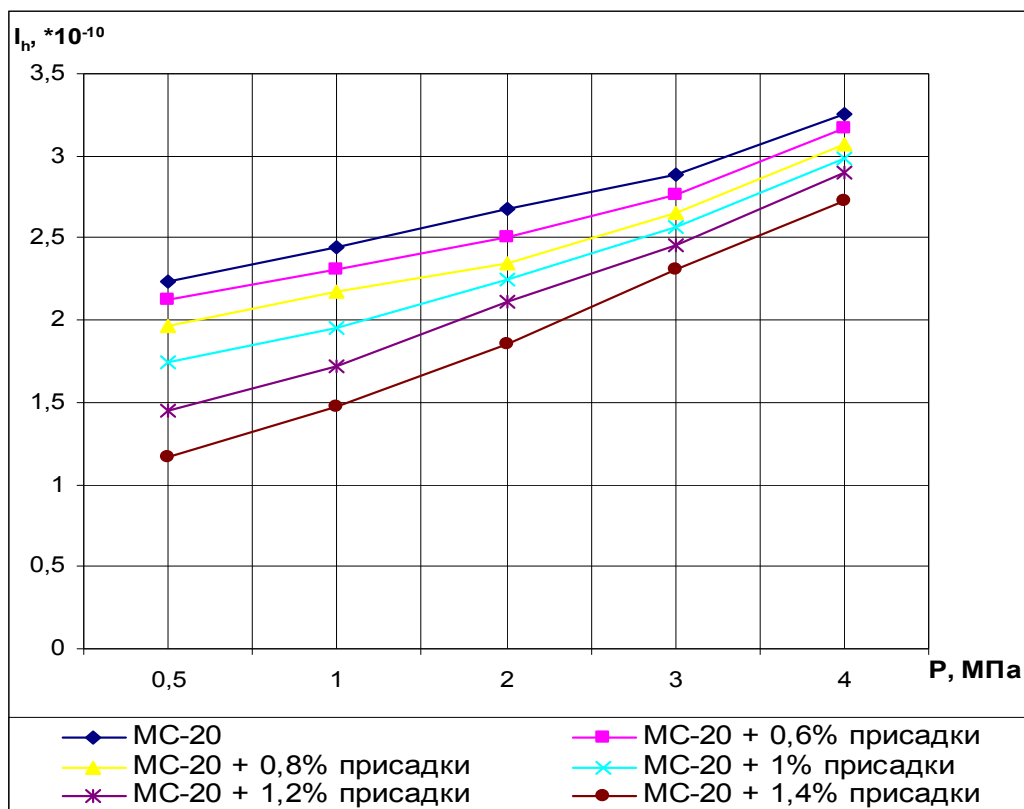
Таблица 9

Наименование пробы	Смазывающая способность, мкм, по EN ИСО 12156	
	С выдерживанием шарика в магнитной камере	Без выдерживания шарика в магнитной камере
У-1.731 Фракция 180...350 оС от 31.08.11	616	595
У-510 резервуар 8 взлив 15.97 от 29.08.11	408	421
Проба №11 (предоставлена АГТУ)	214	337

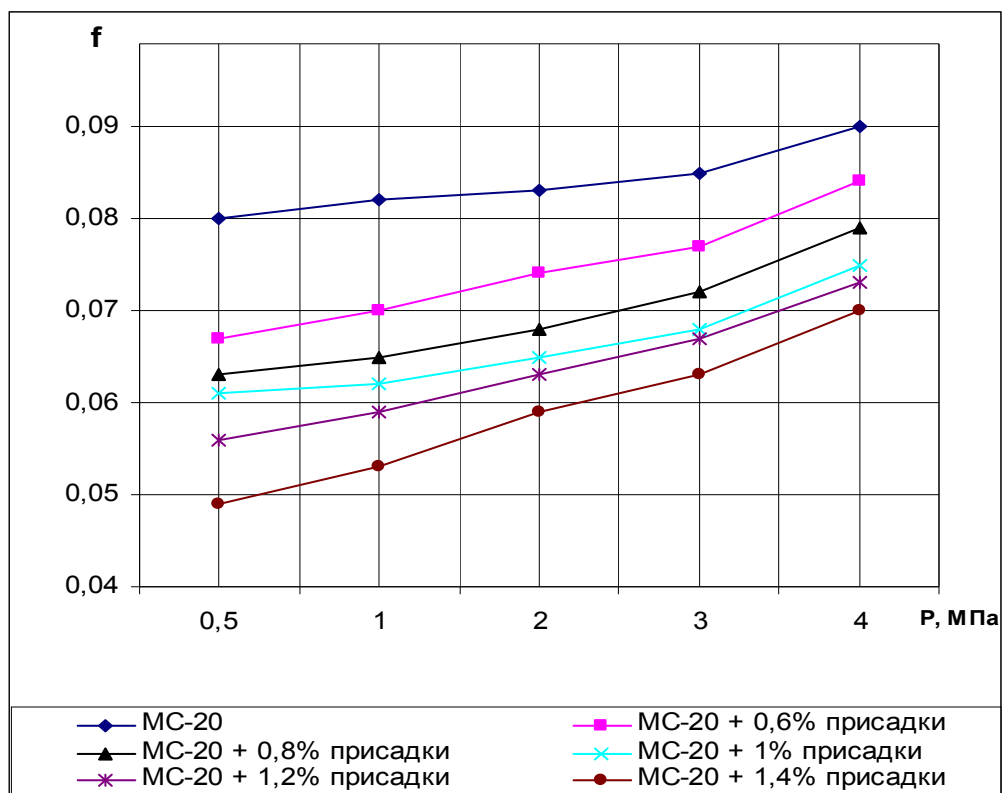
В связи с тем, что смазочную способность дизельного топлива, в соответствии с EN ИСО 12156, оценивают по диаметру пятна износа, то по данным табл. 8 можно сделать вывод о высокой эффективности магнитной присадки, так как наименьшие диаметры пятна износа соответствуют испытаниям «пробы №11» (214 и 337 мкм).

Исследования влияния магнитной присадки на процессы трения и изнашивания металлических пар выполнялись на модернизированной машине 2070 СМТ-1.

На рис. 13, а, б приведены графические зависимости изменения интенсивности изнашивания испытуемых образцов от наличия в масле МС-20 присадки и нагрузки на образцы.



а



б

Рисунок 13 – Изменение интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от давления и концентрации присадки в смазочном масле при температуре 95 °С

Рассмотрение полученных данных позволяет отметить, что наиболее оптимальной является концентрация присадки в диапазоне 1,2...1,4% при наличии внешнего магнитного поля в диапазоне 20...30 кА/м. При этом диапазон интенсивности изнашивания находится в пределах $I_h = 0,16...1,95 \cdot 10^{-10}$.

В шестой главе выполнены теоретические исследования природы коррозионно-механического изнашивания трибосопрежений.

Проведен литературный обзор существующих моделей изнашивания, в результате которого выявились их достоинства и недостатки. Определено, что ни одна модель не дает полного представления о характере коррозионно-механического изнашивания трущихся деталей.

Рассмотрены наиболее характерные виды коррозии, возникающие при перекачивании природного газа, на которые влияют как внутренние факторы, зависящие от природы металла (структуры, состава, метода обработки и т.д.), так и внешние, определяемые составом коррозионной среды и условиями протекания (температура, давление и т.д.).

Проведен анализ влияния механических факторов на процесс коррозии. При этом различают, по крайней мере, пять характерных случаев коррозионно-механического разрушения контактирующих поверхностей, отличающихся своеобразием воздействия механо-физического фактора.

Установлено, что состав природного газа из различных месторождений значительно отличается. Попадая в цилиндр компрессора при перекачке, он оказывает различное воздействие на процесс изнашивания его деталей. В зависимости от содержания агрессивных составляющих, главным из которых является сероводород, влага и температура могут возникать коррозионные процессы, приводящие к коррозионно-механическому изнашиванию деталей ЦПГ. Поэтому для прогнозирования износа ЦПГ необходимо контролировать и учитывать влияние изменения компонентного состава.

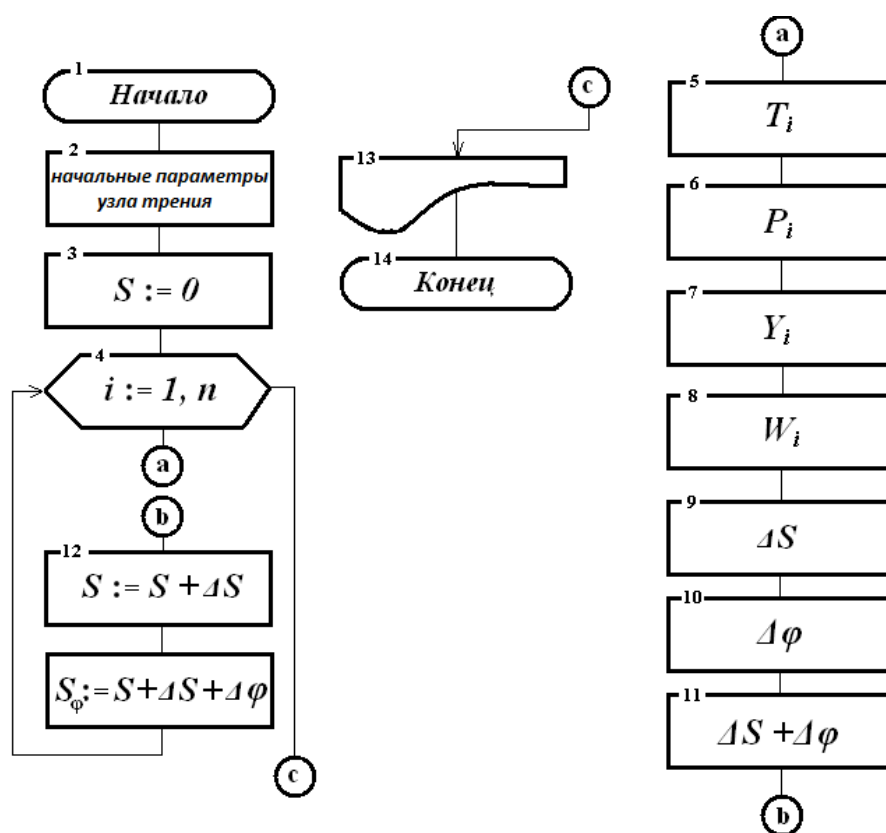


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма расчета износа деталей узла трения

Учитывая большое количество и разнообразие действующих факторов, многие из которых являются следствием различных механических, физических и электрохимических процессов разрушения, становится ясно, что прогнозировать на длительное время такие

величины, как скорость или интенсивность изнашивания, очень трудно, а иногда – невозможно

В связи с многочисленными факторами, влияющими на скорость изнашивания стенки цилиндра поршневого компрессора, то расчет производится для конкретного компрессора, перекачивающего конкретную газовую смесь, параметры компонентов которых могут иметь вероятностные характеристики. Начальные параметры узла трения известны. Процесс изнашивания узла трения для упрощения представляется вместо континуального развития квазистатической расчетной моделью. Величина накопленного износа деталей, входящих в узел трения разбивается на элементарные временные шаги. Интенсивность изнашивания внутри каждого шага считается постоянной, но начало каждого шага начинается с сравнения экспериментальной интенсивности изнашивания в данных условиях. И так до тех пор, пока временная сумма шагов не станет равной времени работы узла трения.

На рис. 14 показана блок-схема алгоритма расчета износа деталей узла трения.

При изучении интенсивности изнашивания пары «кольцо – цилиндр» компрессора, перекачивающего агрессивный природный газ, можно выделить основные факторы, влияющие на интенсивность изнашивания стенки цилиндра (табл. 10).

Таблица 10

Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания стенки цилиндра компрессора

Величина	Обозначение	Размерность	Параметр	Общая размерность
Нагрузка погонная	P_n	MT^{-2}	P_n	MT^{-2}
Скорость скольжения	V_{ck}	LT^{-1}	V_{ck}	LT^{-1}
Температура поверхностей (средняя)	θ^0	θ	θ_1, θ_2	θ^2
Температурный градиент	$\left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)$	θL^{-1}	$\left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_1; \left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_2$	$\theta^2 L^{-2}$
Плотность	ρ	ML^{-3}	$\rho_1; \rho_2$	$M^2 L^{-6}$
Модуль упругости тела	E	$L^{-1}MT^{-2}$	$E_1; E_2$	$L^{-2}M^2T^{-4}$
Твердость поверхности	H	$L^{-1}MT^{-2}$	$H_1; H_2$	$L^{-2}M^2T^{-4}$
Коэффициент формы	S	L^{-1}	$S_1; S_2$	L^{-2}
Высота микронеровности	R	L	$R_1; R_2$	L^2
Толщина покрытия	n	L	$n_1; n_2$	L^2
Удельное сопротивление сдвигу пленки	τ	$L^{-1}MT^{-2}$	$\tau_1; \tau_2$	$L^{-2}M^2T^{-4}$
Коэффициент теплопроводности	λ	$LMT^{-3}\theta^{-1}$	$\lambda_1; \lambda_2$	$L^2M^2T^{-6}\theta^{-2}$
Удельная теплоемкость	C	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$C_1; C_2$	$L^4T^{-4}\theta^{-2}$
Коэффициент теплоотдачи	α	$MT^{-3}\theta^{-1}$	$\alpha_1; \alpha_2$	$M^2T^{-6}\theta^{-2}$
Коррозийный расход	K	$ML^{-2}T^{-1}$	$K_1; K_2$	$M^2L^{-4}T^{-2}$
Теплота абсорбции	Q	$ML^2T^{-2}N^{-1}$	$Q_1; Q_2$	$M^2L^4T^{-4}N^{-2}$
Радиус кривизны (приведенный)	R_{np}	L	R_{np}	L
Универсальная газовая постоянная	R_g (Дж/моль)	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}N^{-1}$	R_g	$ML^2T^{-2}\theta^{-1}N^{-1}$
Влажность	B (кг/моль)	$ML^0T^0\theta^0N^{-1}$	B	$ML^0T^0\theta^0N^{-1}$
Количество H_2S в газе	D (кг/моль)	$ML^0T^0\theta^0N^{-1}$	D	$ML^0T^0\theta^0N^{-1}$
Номинальная площадь трения	A_a	$M^0L^2T^0\theta^0N^0$	$A_{1,2}$	$M^0L^4T^0\theta^0N^0$

Формируя комплексы:

$$\pi_{h_{1,2}} = \frac{h_{1,2} V_{ck}^2 K_{1,2}}{P_{II}^2} - \text{толщина покрытия};$$

$$\pi_B = \frac{B}{V_{ck}^{-2} Q_{1,2}^{1/2}} - \text{влажность};$$

$$\pi_D = \frac{D}{V_{ck}^{-2} Q_{1,2}^{1/2}} - \text{количество } H_2S \text{ в газе};$$

$$\pi_{A_{1,2}} = \frac{A_{1,2}}{P_{II}^4 V_{ck}^{-4} K_{1,2}^{-2}} - \text{номинальная площадь трения},$$

получаем коррозионный критерий подобия:

$$\Phi_{кор} = \frac{\pi_B^{0,5} \cdot \pi_D^{0,5} \cdot \pi_{A_{1,2}}^{0,5}}{\pi_{h_{1,2}}}.$$

$$\Phi_{кор} = \frac{D^{0,5} \cdot B^{0,5} \cdot A_1^{0,5} \cdot A_2^{0,5} \cdot V_{ck}^2}{Q \cdot h_1 \cdot h_2}.$$

Молекулярно-механический критерий выводим путем преобразования и произведения следующих комплексов:

$$\pi_{\rho_{1,2}} = \frac{\rho_{1,2} V_{ck}^2}{K_{1,2}} - \text{плотность};$$

$$\pi_{E_{1,2}} = \frac{E_{1,2}}{V_{ck}^2 K_{1,2}} - \text{модуль упругости};$$

$$\pi_{H_{1,2}} = \frac{H_{1,2}}{V_{ck}^2 K_{1,2}} - \text{твердость};$$

$$\pi_{R_{1,2}} = \frac{R_{1,2} V_{ck}^2 K_{1,2}}{P_{II}^2} - \text{высота микронеровностей};$$

$$\pi_{\tau_{1,2}} = \frac{\tau_{1,2}}{V_{ck}^2 K_{1,2}} - \text{сопротивление сдвигу смазочной пленки};$$

$$\pi_{R_{np}} = \frac{R_{np} V_{ck} K_{1,2}^{1/2}}{P_{II}} - \text{приведенный радиус кривизны}.$$

$$\Phi_{MM} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot P_{II} \cdot K_1^{2,2} \cdot K_2^{2,2} \cdot R_{np} \cdot V_{ck}^{0,4}}{H_1 \cdot H_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \tau_1^{1,7} \cdot \tau_2^{1,7}},$$

где $\tau_{1,2} = \tau_{\min}$.

Критерий, характеризующий свойства граничной смазки адсорбционной природы, а также химическую модификацию и образование защитных поверхностных соединений, в результате трения и действия присадок к смазочным материалам:

$$\Phi_{защ.} = \frac{R \cdot T}{Q} \cdot \frac{RT}{E_x} = \frac{R^2 \cdot T^2}{Q E_x}, \quad \sqrt{\Phi_{защ.}} = \frac{R \cdot T}{\sqrt{Q \cdot E_x}} \Rightarrow \Phi_{защ.} = \frac{R \cdot T}{\sqrt{Q \cdot E_x}}$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура поверхности в месте износа; Q – теплота адсорбции для граничных смазочных слоев; E_x – энергия активации распада межатомных связей химически модифицированных слоев.

Преобразуя комплексы

$$\pi_{\frac{\partial \theta}{\partial n}} = \frac{\left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_{1,2}}{P_{\Pi}^{-2} V_{ck}^2 \theta_{1,2} K_{1,2}} - \text{градиент температуры;}$$

$$\pi_{\lambda_{1,2}} = \frac{\lambda_{1,2} \theta_{1,2}}{P_{\Pi}^2 V_{ck}^2} - \text{коэффициент теплопроводности;}$$

$$\pi_{C_{1,2}} = \frac{C_{1,2} \theta_{1,2}}{V_{ck}^4} - \text{удельная теплоемкость;}$$

$$\pi_{\alpha_{1,2}} = \frac{\alpha_{1,2} \theta_{1,2}}{V_{ck}^4 K_{1,2}} - \text{коэффициент теплоотдачи;}$$

$$\pi_{S_{1,2}} = \frac{S_{1,2} P_{\Pi}^2}{V_{ck}^2 K_{1,2}} - \text{коэффициент формы,}$$

получаем выражение для теплофизического контактного критерия:

$$\Phi_{ТКК} = \frac{grad\theta_1 \cdot grad\theta_2 \cdot c_1^2 \cdot c_2^2 \cdot P_{\Pi}^2 \cdot K_1 \cdot K_2}{V_{ck}^2 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_2}.$$

Интенсивность коррозионно-механического изнашивания принимает вид:

$$I_h = \Phi_{MM}^x \cdot \Phi_{ЗАЩ.}^y \cdot \Phi_{ТКК}^z \cdot \Phi_{КОР}^{\varphi},$$

где Φ_{MM} – молекулярно-механический критерий; $\Phi_{защ.}$ – свойство граничной смазки адсорбционной природы; $\Phi_{ТКК}$ – температурный критерий; $\Phi_{кор}$ – коррозионный критерий; x, y, z, φ – показатели степеней при критериях.

Моделируя процессы изнашивания на установке УТ-1 в условиях коррозионной среды, где главной коррозионной составляющей является H_2S , применительно к изнашиванию цилиндрической втулки поршневого компрессора КМ-2, перекачивающего природный газ, получаем значения входящих переменных.

Используя математический пакет MathCad 14, находим величины степеней x, y, z и φ путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_{MM_1}^x \cdot \Phi_{защ_1}^y \cdot \Phi_{ТКК_1}^z \cdot \Phi_{кор_1}^{\varphi} = 0,5 \cdot 10^{-10} \\ \Phi_{MM_2}^x \cdot \Phi_{защ_2}^y \cdot \Phi_{ТКК_2}^z \cdot \Phi_{кор_2}^{\varphi} = 0,3 \cdot 10^{-9} \\ \Phi_{MM_3}^x \cdot \Phi_{защ_3}^y \cdot \Phi_{ТКК_3}^z \cdot \Phi_{кор_3}^{\varphi} = 0,5 \cdot 10^{-9} \\ \Phi_{MM_4}^x \cdot \Phi_{защ_4}^y \cdot \Phi_{ТКК_4}^z \cdot \Phi_{кор_4}^{\varphi} = 1,2 \cdot 10^{-11} \end{cases}.$$

Таким образом, получаем искомые значения: $x = 1,377, y = 1,309, z = 1,169, \varphi = 1,544$.

Критериальное уравнение интенсивности коррозионно-механического изнашивания принимает вид:

$$I_h = \Phi_{MM}^{1,377} \cdot \Phi_{ЗАЩ.}^{1,309} \cdot \Phi_{ТКК}^{1,169} \cdot \Phi_{КОР}^{1,544}.$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наиболее изнашиваемым участком гильзы цилиндра поршневого компрессора является область

верхней мертвой точки (ВМТ) движения поршня, где давление и температура нагнетания достигают своего максимума за цикл ($P = 3,24$ МПа, $t = 113$ °С).

В верхней мертвой точке гильзы цилиндра компрессора смазочную пленку можно рассматривать как двухфазную, так как в жидкости присутствуют пузырьки водного раствора диэтанолamina с адсорбированным сероводородом. Особенности данного смазочного слоя являются: малая толщина, изменяющееся давление газового потока внутри цилиндра компрессора, изменяющаяся температура стенки цилиндра и самого потока.

Учитывая сложность решения двумерной нестационарной задачи с использованием гетерогенной модели, в основу расчета полей давлений была положена гомогенная модель. В этом случае парожидкостная двухфазная смазочная среда рассматривается как непрерывная односдавленная с осредненными свойствами.

При температуре близкой к 100 °С происходит вскипание водного раствора диэтанолamina и смазывающая пленка разрывается. Это способствует увеличению сближения трущихся поверхностей. С другой стороны выделяющийся из диэтанолamina сероводород в сочетании с частицами воды вызывает повышенное коррозионное воздействие на трущиеся поверхности. Если концентрация сероводорода по условиям технического регламента не должна превышать 0,3% масс, то вследствие разрыва пленок пузырьков с газом его концентрация может достигать 12% и более.

При одновременном действии увеличения давления и температуры на пузырек газа в оболочке из водного раствора диэтанолamina происходят два процесса: при увеличении давления пузырек газа уменьшается в объеме и становится прочнее; при увеличении температуры смазывающей жидкости пузырек в ней стремится расти; при достижении температуры кипения жидкости он лопается, а его жидкая оболочка попадает в смазывающую пленку, разрывая ее и меняя ее химический состав.

Так как наиболее напряженные состояния поверхностей находятся на вершинах микронеровностей, то в этих местах действуют не только высокие механические напряжения, но сероводород при наличии воды обладает большим коррозионным воздействием.

Таким образом, режим трения в ВМТ из гидродинамического переходит в граничный, что существенно влияет на износ гильзы цилиндра. Трение при граничной смазке будет иметь место при толщине смазочной пленки менее 0,05 мкм.

Седьмая глава посвящена описанию разработанной технологии по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования и совершенствованию компрессорной техники.

После очистки природного газа в ректификационных колоннах растворами алканолamiнов от агрессивных составляющих (например, сероводорода) газ подается в сепаратор жидкости, где жидкие составляющие уходят в дренаж, а газ на всасывании - в компрессор, повышающий его давление. Однако при образовании в удаляемой жидкости пены, часть ее через отбойную решетку сепаратора уносится газовым потоком на всасывании в компрессор. При технологических неполадках этот процесс еще более усиливается. Так как перекачиваемый газ является многокомпонентным продуктом с различной температурой конденсации составных фракций, где высокомолекулярные соединения имеют температуру конденсации около 30 °С, то в приемной всасывающей трубе компрессора конденсируется углеводородная жидкость. При ее скоплении и попадании в компрессор возникает влажный ход компрессора – гидравлический удар. Гидравлический удар приводит к разрушению штока компрессора, поломке всасывающих и нагнетательных клапанов и выходу компрессора из рабочего состояния – аварии. Для нормальной работы технологической схемы очистки и повышения давления перекачиваемого газа необходимо ввести технологическую цепочку по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования. На рис. 15 показан ультразвуковой генератор, установленный в сепараторе В06. Его назначение – разрушать образующуюся пену и не допускать ее попадания во всасывающую трубу компрессора.

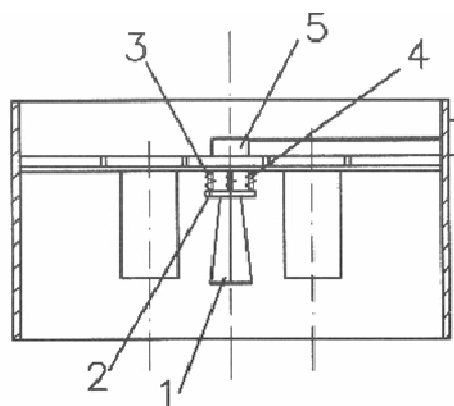


Рисунок 15 – Схема установки ультразвукового генератора в сепараторе В06:
1 – ультразвуковой генератор; 2 – упругое основание; 3 – металлические пружины;
4 – шпильки; 5 – устройство подвода электропитания

На рис. 16 показана схема устройства для предотвращения влажного хода компрессора. При конденсации пара во всасывающей трубе 1 и работе ультразвукового генератора 2 частицы конденсирующейся жидкости под действием ультразвукового поля приводятся в состояние возбуждения и возникает эффект сонолюминесценции, т.е. свечение частиц жидкости в ультрафиолетовом диапазоне. Датчик ультрафиолетового излучения 3 при интенсивности свечения выше порога его чувствительности дает электрический сигнал на отключение электродвигателя компрессора, предотвращая тем самым аварийную ситуацию.

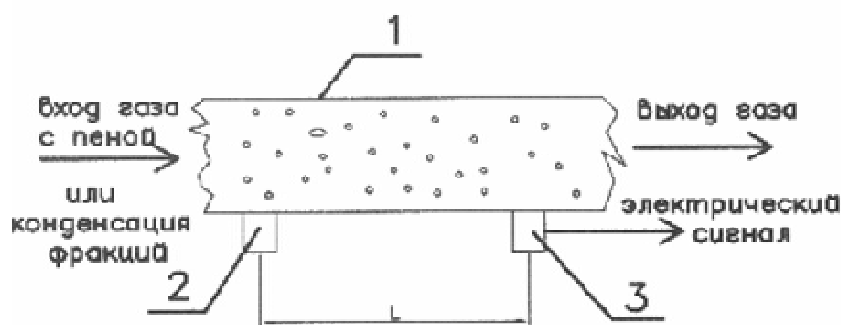


Рисунок 16 – Схема устройства для предотвращения влажного хода компрессора:
1 – всасывающая труба; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – датчик ультрафиолетового излучения; L – расстояние между 2 и 3

На рис. 17 показана технологическая схема очистки газа с установленными устройствами безопасности. Предложенная схема гарантирует безопасную работу компрессора даже при технологических сбоях в системе очистки природного газа от агрессивных составляющих алканолaminaми (например, диэтанолaмин – ДЭА и моноэтанолaмин – МЭА) и низкой температуры на всасывающей трубе компрессора.

Данная схема обладает следующими преимуществами:

- полностью исключено попадание частиц жидкости в компрессор, перекачивающий природный газ;
- оборудование, применяемое для разрабатываемых устройств, выпускается отечественной промышленностью, поэтому применение его экономически рентабельно;
- повышена надежность компрессорного оборудования, так как устраняется попадание малых количеств алканолaминов в смазочное масло и уменьшается изнашивание цилиндропоршневой группы компрессора;
- устраняется опасность возникновения аварий компрессора и повышена безопасность для обслуживающего персонала;
- обеспечивается возможность диагностики правильной эксплуатации технологического оборудования по очистке газа от агрессивных примесей.

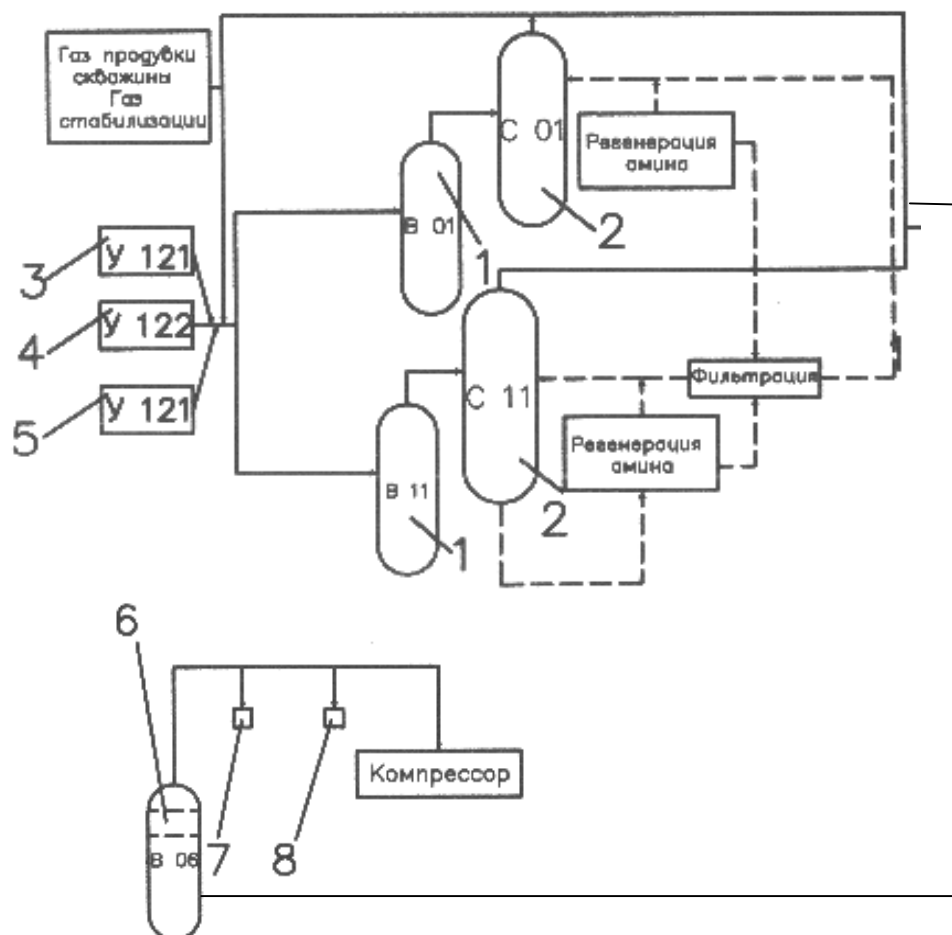


Рисунок 17 – Технологическая схема очистки газа с установленными устройствами безопасности:

1 – В01, В06, В11 – сепараторы; 2 – С01, С11 – абсорберы; 3 – У 121 – установка стабилизации конденсата; 4 – У 122 – установка обработки заводской технологической воды; 5 – У 172 – установка очистки исходного газа раствором ДЭА; 6,7 – ультразвуковые генераторы; 8 – датчик ультрафиолетового излучения

На основании проведенного анализа различных схем и конструкций компрессоров и других ГПА, предложена запатентованная автором схема многоцилиндрового бесшатунного компрессора.

Данное устройство обладает следующими преимуществами:

- 1) небольшая масса, малые габариты, имеющие малое количество подвижных частей за счет применения бесшатунного механизма с круговыми звеньями, что дало возможность увеличить мощность компрессора на единицу массы и уменьшить габариты компрессора;
- 2) вся конструкция механизма, его движение реализуются в одной плоскости, электродвигатель может располагаться внутри ведущего колеса;
- 3) в конструкции компрессора отсутствуют шатуны, механизм привода компрессора состоит из ведущего колеса, выполненного в виде двух цилиндров аксиального типа, больший из которых имеет обод трапециидальной формы, вследствие чего конструкция является более уравновешенной и устойчивой.

В приложения вынесены: организационно-технологическая схема работ, направленных на повышение надежности и износостойкости оборудования, полученные в процессе выполнения работы дипломы и патенты, результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученные акты о внедрениях и испытаниях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное научное и народно-хозяйственное значение – повышение износостойкости трибосопряжений компрессорного оборудования, работающих в сероводород содержащих смазочных материалах.

1. Разработаны и изготовлены (патент РФ №2239171, патент РФ №2234074, патент РФ №57908, патент РФ №115917) испытательные установки для исследования процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в сероводородсодержащих смазочных материалах.

2. Показано, что наличие малых концентраций этаноламинов (0,1...0,2% масс.) и влаги (0,2...1,0% об.) в смазочных материалах повышает скорость изнашивания цилиндропоршневой группы компрессора в 6...8 раз, а также установлено, что содержание сероводорода в зоне трения пары «поршневое кольцо-гильза цилиндра» превышает его количество в перекачиваемом природном газе в 12...26 раз, что ведет к интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию подвижных сопряжений.

3. Результаты исследований разработанных композиций противоизносных присадок показали, что использование масла ХС-40 с композицией присадок №19 (Бетол-1 + АДА + Трибокор-М) в 0,3% по массе позволяет снизить интенсивность изнашивания на 30...50% в сравнении с использованием масла Orites-270 DS.

4. Установлено негативное воздействие сероводорода, находящегося в газовой среде перекачиваемого природного газа, на изнашивание пар трения ЦПГ, на основе чего разработаны критерий коррозионной стойкости и уравнение для прогнозирования коррозионно-механического изнашивания ЦПГ компрессора.

5. Предложено критериальное уравнение интенсивности изнашивания гильзы цилиндра, полученное на основе теории размерности для моделирования коррозионно-механического изнашивания подвижных сопряжений компрессоров, перекачивающих природный газ, содержащий сероводород. Впервые получены нелинейные уравнения, аппроксимирующие ряд трибологических исследуемых процессов, в частности, по изменению, например, коэффициентов трения.

6. Предложен метод и устройство (патент РФ №2303754, патент РФ №2370735), предотвращающее аварийный выход из строя компрессора в результате «влажного» хода, а также схема привода многоцилиндрового бесшатунного компрессора (патент РФ №2290535). Предложено устройство (патент РФ №2214854), обеспечивающее уменьшение попадания этаноламинов и влаги на 50...70% в цилиндропоршневую группу компрессора.

7. Проведены трибологические исследования запатентованных магнитных противоизносных присадок и их композиций, результаты которых показали снижение коэффициента трения в трибосопряжениях в 1,5...2,0 раза при использовании отечественных смазочных масел. Таким образом, полученные магнитные смазочные композиции превосходят зарубежные аналоги по своим эксплуатационным характеристикам.

8. С помощью разработанной технологии производства магнитных присадок на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ получены и испытаны экспериментальные образцы присадки с заданным диаметром частиц ($d = 10...100 \text{ нм}$). Результаты испытаний МЖ подтвердили ее эффективность, т.к. износостойкость трибосопряжений повышается в 1,5...2 раза, вязкость смазочной среды – в 1,7...1,8 раза.

9. Результаты диссертационной работы внедрены на Астраханском газоперекачивающем заводе и в учебном процессе Астраханского государственного технического университета при подготовке специалистов по дисциплинам «Теоретическая механика», «Прикладная механика», «Механика», «Теория изнашивания». Экономический эффект от внедрения технических разработок составил более 2,3 млн. руб. на один компрессор.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Перекрестов, А.П. Прогнозирование изнашивания поршневой группы компрессора в условиях сероводородной коррозии / А.П. Перекрестов, В.А. Кривоносов // Вестник машиностроения. – №2. – 2003. – С. 29-31.
2. Перекрестов, А.П. Моделирование процесса изнашивания в агрессивной газовой среде / А.П. Перекрестов, В.А. Кривоносов // Вестник машиностроения. – № 1. – 2004. – С. 29-31.
3. Перекрестов, А.П. Коррозионно-механическое изнашивание конструкционных материалов при наличии в масле этаноламинов / А.П. Перекрестов // Вестник машиностроения. – №12. – 2004. – С. 32-34.
4. Перекрестов, А.П. Зависимость коррозионно-механического изнашивания конструкционных материалов от наличия в смазке малых количеств этаноламинов / А.П. Перекрестов, В.А. Кривоносов // Вестник машиностроения. – №3. – 2006. – С. 43-44.
5. Перекрестов, А.П. Влияние сероводорода на интенсивность коррозионно-механического изнашивания / А.П. Перекрестов // Вестник машиностроения. – №9. – 2006. – С. 49-51.
6. Перекрестов, А.П. Влияние агрессивных составляющих природного газа на изнашивание поршневых колец компрессоров, перекачивающих газ / А.П. Перекрестов // Тяжелое машиностроение. – №8. – 2007. – С. 19-20.
7. Перекрестов, А.П. Механизм действия противоизносной присадки на магнитной основе / А.П. Перекрестов, В.А. Непомнящий // Вестник Астраханского государственного технического университета. – №2. – 2008. – С. 46-50.
8. Перекрестов, А.П. Противоизносные присадки в дизельное топливо и их развитие / А.П. Перекрестов, А.А. Брайко // Вестник Астраханского государственного технического университета. – №2. – 2008. – С. 218-221.
9. Перекрестов, А.П. Повышение надежности и износостойкости дизельной аппаратуры путем применения противоизносной магнитной присадки / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков // Тяжелое машиностроение. – №3. – 2008. – С.27-29.
10. Перекрестов, А.П. Определение интенсивности изнашивания в агрессивных газовых средах, являющихся компонентами перерабатываемого и перекачиваемого природного газа / А.П. Перекрестов // Упрочняющие технологии и покрытия. – №5. – 2009. – С. 48-55.
11. Перекрестов, А.П. Формирование антифрикционного покрытия трущихся поверхностей при использовании противоизносной присадки нового поколения / А.П. Перекрестов, М.А. Саидов, А.А. Клыканова, В.А. Чанчиков // Вестник АГТУ, серия «Морская техника и технология». – №1. – 2009. – С. 25-27.
12. Перекрестов, А.П. Повышение смазочной способности малосернистых дизельных топлив / А.П. Перекрестов // Вестник машиностроения. – №10. – 2009. – С. 31-33.
13. Перекрестов, А.П. Пути снижения токсичности отработавших газов дизельного двигателя / А.П. Перекрестов, М.А. Саидов // Экология и промышленность России. – 2009. – С. 40-41.
14. Перекрестов, А.П. Способы повышения работоспособности подшипников скольжения / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков // Вестник АГТУ. – №1. – 2010. – С. 147-152.
15. Perekrestov A.P. Improving the lubricant properties of low-sulfur diesel fuel / A.P. Perekrestov // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29. – №10. – p. 983-985.
16. Perekrestov A.P. Physicochemical phenomena in the lubricant of the cylinder-piston group of a compressor with corrosive mechanical wear / A.P. Perekrestov // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – №4. – p. 347-350.

17. Перекрестов, А.П. Определение оптимальной концентрации магнитной противоизносной присадки в смазочных маслах / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, В.Г. Боловин // Вестник машиностроения. – №9. – 2012. – С. 46-49.
18. Перекрестов, А.П. Экспериментальные исследования и оптимизация физико-механических свойств магнитных смазочных материалов / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, В.Г. Боловин // Вестник машиностроения. – №6. – 2013. – С. 43-45.
19. Перекрестов, А.П. Повышение износостойкости деталей цилиндропоршневой группы судового дизельного двигателя путем модифицирования смазочных материалов / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко // Вестник машиностроения. – №12. – 2014. – С. 43-47.
20. Perekrestov A.P. Modified lubricants for increasing the wear resistance of cylinder assemblies in marine diesel engines / A.P. Perekrestov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – №3. – p. 185-188.
21. Перекрестов, А.П. Исследование влияния дисперсности слоистых модификаторов трения на противоизносные свойства смазочных материалов / А.П. Перекрестов, И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, С.А. Свекольников, О.В. Бурмистрова // Известия Самарского научного центра РАН. – Т. 18. – 2016. - №1 (2). – С. 187-192.
22. Перекрестов, А.П. Перспективы производства и популяризации в России отечественных противоизносных присадок для малосернистых дизельных топлив и моторных смазочных масел / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, С.А. Свекольников, О.В. Бурмистрова, Н.В. Прямухина // Успехи современной науки и образования. – Т.5. – 2016. - №7. – С. 80-85.

в свидетельствах Роспатента на изобретения и полезные модели:

23. Пат. №2214854 Российская Федерация, МПК 7B01D 45/08 19/02 Газожижидкостный сепаратор / А.П. Перекрестов, Р.К. Насыров. – №2002101719/12; заявл.17.01.2002; опубл. 27.10.2003, Бюл. №30.
24. Пат. №2234074 Российская Федерация, МПК 7G01N 3/56 Машина трения / А.П. Перекрестов, Т.О. Невенчанная, А.Ю. Митин. – №2002120249; заявл. 25.07.2002; опубл. 10.08.2004, Бюл. №22.
25. Пат. №2239171 Российская Федерация, МПК 7G01N 3/56 Машина трения / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов. – №2002120247; заявл. 25.07.2002; опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.
26. Пат. №2276681 Российская Федерация, МПК C10L 1/18 Противоизносная присадка / А.П. Перекрестов, А.А. Сычева. – №2004132806/04; заявл. 10.11.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. №14.
27. Пат. №57908 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 Устройство для определения изнашивания пар трения / А.П. Перекрестов. – №2005100191/22; заявл. 11.01.2005; опубл. 27.10.2006, Бюл. №30.
28. Пат. №2290535 Российская Федерация, МПК F04B 27/00 Многоцилиндровый поршневой бесшатунный компрессор / А.П. Перекрестов, Д.С. Дюсенбаев. – №2005105186/06; заявл. 24.02.2005; опубл. 27.12.2006, Бюл. №36.
29. Пат. №2303754 Российская Федерация, МПК F25B 1/00 (2006.01), F16P 7/02 (2006.01), F25B 49/02 (2006.01) Устройство для предотвращения влажного хода компрессора / А.П. Перекрестов, Д.Ф. Нгуен. – №2005139242/11; заявл. 15.12.2005; опубл. 27.07.2007, Бюл. №21.
30. Пат. №70579 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006.01) Трибометр / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков. – №2007130186; заявл. 06.08.2007; опубл. 27.01.2008, Бюл. №3.
31. Пат. №72069 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006.01) Трибометр / А.П. Перекрестов. – №2007140301; заявл. 30.10.2007; опубл. 27.03.2008, Бюл. 9.

32. Пат. №2348025 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006/01) Устройство для определения эффективности противоизносных магнитных присадок / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков. – №2007130137/28; заявл. 06.08.2007; опубл. 27.02.2009, Бюл. №6.
33. Пат. №2370735 Российская Федерация, МПК G01F 23/292, G01N 25/68 Устройство для измерения количества сконденсированного пара / А.П. Перекрестов. – №2008128866/28 (035603); заявл. 14.07.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. №29.
34. Пат. №97003 Российская Федерация, МПК H01F 13/00 Устройство для намагничивания шпилек и гайки поршневого компрессора / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов. – №2010108054/22; заявл. 04.03.2010; опубл. 20.08.2010, Бюл. №23.
35. Пат. №115917 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 Машина трения / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, В.Н. Миронов. – №2011149211/28; заявл. 02.12.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. №13.
36. Пат. №2494319 Российская Федерация, МПК F25B 49/02 (2006.01), F04B 49/10 (2006.01), F04C 28/28 (2006.01) Устройство для предотвращения влажного хода компрессора / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов. – №2011149092/06; заявл. 01.12.2011; опубл. 27.09.2013, Бюл. №27.
37. Пат. №2525404 Российская Федерация, МПК C10M 125/10 (2006.01) Противоизносная присадка / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, В.Г. Боловин, И.Н. Гужвенко, С.А. Свекольников. – №2012149297/04; заявл. 19.11.2012; опубл. 27.05.2014, Бюл. №22.
38. Пат. №2570643 Российская Федерация, МПК C10M 169/04 (2006.01) Противоизносная присадка / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко, С.А. Свекольников. – №2014130314/04. – заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. №34.

в зарубежных изданиях:

39. Перекрестов, А.П. Оптимизация интенсивности изнашивания цилиндропоршневой группы компрессора / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010 в 2-х частях. Минск, 25 октября – 1 ноября. – Минск, БГУ, 2010. - Ч. 1. - С. 567-572.
40. Перекрестов, А.П. Технология предотвращения аварийности при заводской обработке природного газа / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010 в 2-х частях. Минск, 25 октября – 1 ноября. – Минск, БГУ, 2010. - Ч. 1. - С. 567-572.

в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов:

41. Перекрестов, А.П. Исследование противоизносных и смазочных свойств масел МС-20, ORITES-270 DS и ХС-40 / А.П. Перекрестов, В.А. Кривоносов // Материалы научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин». – Астрахань, 2002. – С. 102-104.
42. Перекрестов, А.П. Прогнозирование изнашивания в условиях сероводородной коррозии на основе трибологических инвариантов / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов // Материалы X юбилейного международного научного семинара «Технологические проблемы прочности». – Подольск, 2003. – С. 46-51.
43. Перекрестов, А.П. Моделирование процесса изнашивания в агрессивной газовой среде / А.П. Перекрестов, В.А. Кривоносов // Сборник научных трудов VIII Международной конференции «Образование, Экология, Экономика, Информатика», серия «Нелинейный мир». – Астрахань, 2004. – С. 205-209.
44. Перекрестов, А.П. Атомно-абсорбционный экспресс-метод определения интенсивности изнашивания пар трения / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов, Г.И.

- Сокирко // Образование. Экология. Экономика. Информатика. – Сб. науч. труд. VIII Межд. конф. из серии «Нелинейный мир» / Под. ред. Н.В. Амосовой, И.Б. Коваленко, А.Б. Ольневой. – Астрахань: ИПЦ «Факел», 2004. – С.210-213.
45. Перекрестов, А.П. Прогнозирование коррозионно-механического изнашивания конструкционных материалов при наличии в масле этаноламинов / А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов // Материалы международного научного семинара «Технологические проблемы прочности». – Подольск, 2004. – С. 37-41.
46. Перекрестов, А.П. Рассмотрение некоторых аспектов коррозионно-механического изнашивания / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов // Сборник статей X Международной НПК «Современные технологии в машиностроении». – Пенза, 2006. – С. 82-85.
47. Перекрестов, А.П. Прогнозирование изнашивания поршневых колец компрессора, перекачивающего природный газ / А.П. Перекрестов // Славянтрибо-7а. Теоретические и прикладные новшества и инновации обеспечения качества в конкурентоспособности инфраструктуры сквозной логической поддержки трибообъектов и их производства. Материалы международной научно-практической школы-конференции. – Т. 2. – Санкт-Петербург, Пушкин, 2006. – С. 152-159.
48. Перекрестов, А.П. Некоторые закономерности движения и осаждения противоизносной присадки в магнитном поле / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков // Материалы III Международной научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин». – Астрахань, 2007. – С. 86-87.
49. Перекрестов, А.П. Влияние коррозионного действия газовой среды на интенсивность изнашивания материала цилиндропоршневой группы компрессора / А.П. Перекрестов, А.Б. Ольнева // Материалы III Международной научной конференции «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин». – Астрахань, 2007. – С. 84-87.
50. Перекрестов, А.П. Моделирование коррозионно-механического изнашивания компрессорного оборудования по переработке природного газа / А.П. Перекрестов // Сборник докладов совещания-семинара заведующих кафедрами теоретической механики Южного Федерального Округа. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2008. – С. 73-76.
51. Перекрестов, А.П. Влияние фактора коррозионности на интенсивность изнашивания цилиндропоршневого компрессора / А.П. Перекрестов // Сборник докладов совещания-семинара заведующих кафедрами теоретической механики Южного Федерального Округа. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 63-65.
52. Перекрестов, А.П. Анализ вероятностных процессов изнашивания оборудования в агрессивных газовых средах / А.П. Перекрестов, А.Б. Тагиров // Сборник докладов совещания-семинара заведующих кафедрами теоретической механики Южного Федерального Округа. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 71-73.
53. Перекрестов, А.П. Влияние процентного содержания агрессивных компонентов на процесс трибокоррозии / А.П. Перекрестов, А.Б. Тагиров, А.А. Клыканова, В.М. Роткин // Сборник докладов IV Всероссийского совещания-семинара заведующих кафедрами и ведущих преподавателей теоретической механики вузов РФ, 21-24 сентября 2010 г. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 181-184.
54. Перекрестов, А.П. Повышение износостойкости компрессора КМ-2 / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов, А.А. Клыканова // Сборник докладов IV Всероссийского совещания-семинара заведующих кафедрами и ведущих преподавателей теоретической механики вузов РФ, 21-24 сентября 2010 г. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 189-193.
55. Перекрестов, А.П. Снижение интенсивности изнашивания пары трения «цапфа – вкладыш» как направление увеличения ресурса системы судового валопровода / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, А.А. Клыканова // V сессия Научного совета РАН по механике деформируемого твердого тела: тез. докл. Всеросс. конф. 31 мая – 5 июня

2011 г., Астрахань, Россия / под науч. ред. Н.Ф. Морозова, М.Н. Покусаева; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2011. – С. 75-76.

- 56.** Перекрестов, А.П. Трибологические процессы в сопряжениях машин и механизмов при использовании анамегаторов на основе мицеллярных противоизносных присадок / А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, М.А. Саидов // Трибология и надежность: Труды XIV Международной конференции, 15-17 сентября 2014 г. / Под общ. ред. проф. Войнова К.Н., Санкт-Петербург. – С. 251-263.
- 57.** Перекрестов, А.П. Разработка противоизносных присадок и оценка их трибологической эффективности при использовании в смазочных маслах дизельных двигателей / И.Н. Гужвенко, А.П. Перекрестов, В.А. Чанчиков, О.В. Бурмистрова, Е.Р. Галяув // «Механики XXI века». – 2015 г. – №14. – С. 220-228.
- 58.** Перекрестов, А.П. Об улучшении работы компрессора в агрессивной среде / А.П. Перекрестов // Трибология: Международная энциклопедия. Т. X. Моделирование и расчеты в трибологии и надежности / под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: Нестор-История, 2015. – С. 155-174.