

На правах рукописи

05

СМИРНОВ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ
В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОСРЕДСТВОМ
ТРИБОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Специальность

2.5.3. – Трение и износ в машинах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Научный руководитель:

Албагачиев Али Юсупович
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Малышев Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет Нефти и газа (национальный
исследовательский университет)
имени И.М. Губкина»,
профессор кафедры «Трибология и технология
ремонта нефтегазового оборудования»

Хопин Петр Николаевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)", профессор кафедры "Технология
производства и эксплуатации двигателей
летательных аппаратов"

Сидоров Михаил Игоревич
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет», заместитель
начальника отдела «Инжиниринговый центр
мобильных решений»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО "Тверской государственный
технический университет", г. Тверь.

Защита состоится «27» октября 2023 года в 12:30 часов на заседании диссертационного
совета 99.0.033.02, созданного на базе ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Бла-
гонравова Российской академии наук» и ФГБОУ ВО «Брянский государственный тех-
нический университет», по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б,
учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государ-
ственный технический университет», а также на сайте университета [https://www.tu-
bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/smirnov-nikolay-ivanovich](https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/smirnov-nikolay-ivanovich)

Автореферат разослан « » 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент


В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие нефтедобывающей отрасли в России происходит на фоне заметного ухудшения структуры запасов нефти и сопровождается увеличением количества малодебитных скважин, нерентабельных в эксплуатации, и доли трудно извлекаемых запасов. Основным видом оборудования для механизированной добычи трудноизвлекаемых запасов в России являются установки электроприводных лопастных насосов (УЭЛН), которыми добывается свыше 80% нефти. Эффективность их использования в значительной степени определяется износостойкостью, на которую негативно влияет изменение состава и качества пластовой жидкости за период эксплуатации установки - изменяется количество механических примесей, газа, воды, коррозионно-активных веществ и т.д. Периодические режимы эксплуатации, регулирование частоты вращения, изменение трибодинамических характеристик вследствие изнашивания обуславливают возникновение нестационарных процессов, которые увеличивают вероятность разрушения корпусных деталей ("полет", "промыв"), валов, что приводит к многомиллионным затратам на ремонт оборудования и восстановление работоспособности скважин.

УЭЛН принципиально отличается от остальных типов роторных машин отношением длины установки к диаметру корпуса – до 500, что является конструктивной особенностью, влияющей на динамику, которая определяется процессами изнашивания пар трения, условиями эксплуатации. Трибологическая система включает несколько сотен трибосопряжений, реализуется несколько видов изнашивания: абразивный, эрозионный, коррозионно-механический износ, фреттинг-износ, мало изученных вследствие работы оборудования в условиях информационной неопределенности. Динамика насоса в значительной степени влияет на возникновение дополнительных напряжений в элементах конструкции, которые при определенных условиях могут превышать допустимые величины.

В настоящее время практически отсутствуют глубокие исследования о взаимовлиянии износа трибосопряжений и динамических характеристик УЭЛН при эксплуатации. Основные подходы заключаются в рассмотрении отдельных аспектов ресурса УЭЛН и применении новых материалов. Проверка новых технических решений или технологий проводится в основном на насосных сборках или универсальных машинах трения, а также в эксплуатационных условиях.

Наиболее актуальными, в связи с этим являются исследования основных трибологических процессов динамической системы, направленные на обеспечение износостойкости УЭЛН при нестационарных режимах эксплуатации, на основе изучения особенностей трения и износа насосных секций.

Объект исследования - насосные секции (НС) - основные элементы УЭЛН, включающие ступени нефтяные (СН) с радиальными и осевыми сопряжениями, подшипники, функционирующие в нестационарных условиях и при наличии в жидкости механических примесей, воды, коррозионно-активных веществ.

Предмет исследования - трибологические и динамические процессы в УЭЛН, методы повышения и прогнозирования износостойкости трибологических узлов, работающих в условиях периодических режимов, при наличии в пластовой жидкости механических примесей, воды, коррозионно-активных веществ.

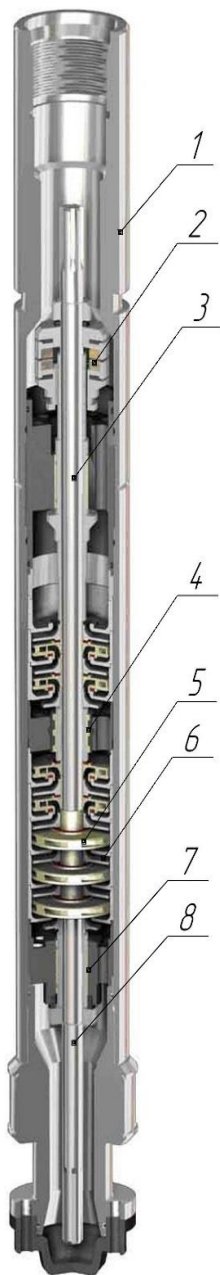
Целью работы является решение проблемы повышения износостойкости НС при нестационарных режимах эксплуатации на основе исследования процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания радиальных и осевых сопряжений СН, подшипников и материалов с учетом динамики насосной секции.

Методы и достоверность исследований.

Применялись расчетно-экспериментальные методы для получения научных знаний, основанные на

корректном применении физических моделей износа и представительных экспериментах с использованием разработанного современного исследовательского оборудования. В работе использованы основные положения теории трения, теории изнашивания, основные положения теории подобию.

Рис.1-насосная секция: 1-корпус, 2-подшипник упорный, 3, 7-подшипник радиальный, 4-подшипник промежуточный, 5-рабочее колесо (РК), 6-направляющий аппарат (НА), 8-вал



Достоверность и обоснованность полученных результатов базируется на большом количестве статистического материала по отказам реального оборудования с подтверждением стендовыми и натурными испытаниями для условий работы реального оборудования. При проведении исследований использовались стандартизованные, а также, принятые в научной практике, методы статистической обработки экспериментальных данных и планирования опытов, и методика расчета интенсивности изнашивания поверхности деталей.

Научная новизна полученных результатов.

1. Установлены закономерности изменения износа трибосопряжений и амплитуды виброскорости по длине секции, заключающиеся в подобию их формы, в преимущественном влиянии износа радиальных сопряжений на изгибные колебания, а износа осевых сопряжений на крутильные колебания. Получен диагности-

ческий признак повышенного износа, заключающийся в появлении $\frac{1}{2}$ гармоники в спектре частот колебаний. (п.10 Паспорта).

2. Впервые получены критерии аффинного подобия природы и модели насосной секции УЭЛН как динамической системы, которые нашли применение в конструкции научно-исследовательских стендов и разработке трибодинамической модели секции. (п.10 Паспорта).

3. На основании результатов численного моделирования динамики с износом и испытаний насосных секций установлена связь между формой изменения износа радиальных сопряжений и видом прецессии вала. Получена зависимость виброскорости секции от величины износа радиальных сопряжений. (п.10 Паспорта).

4. Разработана трибологическая модель ступени при прецессионном вращении вала на основе суперпозиции процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания, включающая кинетические, гидравлические факторы, свойства материалов и среды, и расчетная зависимость износа сопряжений. (п.10 Паспорта)

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс испытательных стендов и методик, позволяющих надежно получать триботехнические характеристики критических узлов и материалов УЭЛН в условиях, приближенных к реальным. С участием автора разработан Стандарт РФ 56830-2015 «Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов».

2. Разработана модель и методика коррозионно-эрозионного изнашивания СН, включающая определение зоны локального износа и скорость коррозионно-эрозионного изнашивания.

3. Разработаны новые перспективные решения по повышению ресурса, конструкции подшипников, уплотнений СН, работающих в условиях нестационарных нагрузок, подтвержденные патентами.

4. Получены на основе экспериментов характеристики износостойкости широкого класса материалов ступеней, в частности порошковых сталей, чугунов Ni-Resist и подшипников в условиях, близких к эксплуатационным, которые можно использовать при проектировании и модернизации трибологических узлов.

5. Разработан комплекс испытательных стендов для исследования трибологических характеристик ступеней, упорных и радиальных подшипников, материалов, уплотнений перспективных высокооборотных (до 12000 об/мин) УЭЛН.

6. На основе основных положений работы решена задача устранения отказов УЭЛН - "полет" в нефтяных компаниях России. Работа удостоена Премии Правительства РФ в области науки и техники. Экономический эффект от внедре-

ния результатов работы в ЦБПО ЭПУ ОАО "Сургутнефтегаз" составил 207.735.816 рублей, в ОАО "Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз" – свыше 120 млн.руб.

Положения, выносимые на защиту, включают:

1. Концепцию обеспечения и прогнозирования износостойкости ЭЛН как трибодинамической системы на основании физического моделирования процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания трибосопряжений и динамики установки.

2. Методологию разработки комплекса испытательных стендов для исследования механизмов изнашивания, в том числе при прецессионном вращении вала, и определения трибологических характеристик ресурсопределяющих деталей и узлов УЭЛН.

3. Установленную взаимосвязь формы износа, скорости изнашивания трибосопряжений и типа вращения вала; зависимость динамических характеристик секции от износа.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований изнашивания трибосопряжений в абразивосодержащей, коррозионно-активной среде.

Личный вклад соискателя. Автором получены лично основные положения, выносимые на защиту.

Реализация результатов работы:

Результаты выполненной автором работы используются на предприятиях нефтегазового комплекса: в научных разработках АО «АЛНАС», при внедрении новых порошковых материалов в АО «НОВОМЕТ», при совершенствовании технологии изготовления рабочих органов в ООО «Керамет», при разработке рекомендаций по повышению ресурса УЭЛН в ООО «Борец», при отработке технологии изготовления упорных подшипников в компании Schlumberger.

Апробация работы.

Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийских научно-технических конференциях с участием иностранных специалистов «Трибология - машиностроению», 2014 – 2022г.; Международных практических конференциях «Механизованная добыча» в 2010-2022г.г.; 2nd International Conference on Abrasive Processes 8 - 10 September 2014 Cambridge UK; 44th ICMCTF 2017 International Conference on Metallurgical Coatings & Thin Films; 21st International Conference on Wear of Materials Wear of Materials 2017. USA; Конференции компании «ТНК-ВР»: Проблемы механизированной добычи нефти 2013 г.; Конференции «Эксплуатация осложненного фонда скважин '2013» г. Казань; Всероссийской научно-производственной конференции: Методы борьбы со скважинными отложениями. Повышение МРП глубинно-насосного

оборудования, г. Ижевск, 2013 г.; 13-й международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано - до макроуровня», 2011 г.; Первой практической конференции «Сервис механизированного фонда 2014». Москва, 2014; 3-й научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации малодебитного фонда скважин-2020». Москва, 2020 г.; Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология». Гомель, 2015.

Диссертационная работа заслушана в полном объеме на заседании научного семинара «По трению и износу в машинах» им. М.М. Хрущева отдела «Трение, износ и смазка. Трибология» ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 53 научные работы, в том числе 26 публикаций в ведущих периодических изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 11 работ в зарубежных изданиях, включенных в международные реферативные базы (Web of Science, Scopus). Получены 8 патентов на изобретения, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы, содержащего 323 источника и 3 приложений. Работа изложена на 454 страницах, содержит 225 рисунков и 72 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, изложены ее научная новизна и практическая значимость, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе проанализированы существующие научно-методические подходы к исследованию процессов трения и изнашивания лопастных насосов в пластовой жидкости, содержащей механические примеси и коррозионно-активные элементы, при наличии динамических возмущений, обусловленных эксплуатацией и износом. Выделены современные тенденции в решении проблемы повышения износостойкости трибосопряжений для предотвращения отказов функционирования и параметрических отказов.

Вопросам конструирования и расчета гидравлических характеристик УЭЛН, материаловедения посвящены работы А.А. Богданова, В.Н. Филиппова, М.Д. Айзенштейна, И.М. Муравьева, П.Д. Ляпкина, И.Т. Мищенко, Л.Г. Чичерова, Н.Ф. Ивановского, А.Н. Дроздова, Ш.Р. Агеева, В.Н. Ивановского, других исследователей, а также иностранных специалистов ведущих компаний REDA, ODI, Schlumberger, Baker Hughes - Gulich J.F, Takacs Gabor, Wilson B.L., Kobylinski L.S., King D.G., Traylor F.T., Stewart R. E., Brinner T.R., Durham M.O. и др. В области иссле-

дования износа центробежных насосов различного назначения известны работы А.К.Дьячкова, Л.С.Животовского, В.Я.Карелина, С.П.Козырева, В.В.Фомина, В.И.Мудряка, Ю.Н.Дроздова.

Научные основы обеспечения износостойкости сложных механических систем на основе изучения законов изнашивания созданы ведущими учеными в области трибологии, материаловедения. Большой вклад в развитие учения о трении, износе и смазке сделали А.С. Ахматов, А.Ю. Албагачиев, Э.Д. Браун, Ф.П. Буден, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, А.В. Белый, А.С. Васильев, Н.А. Воронин, И.Г. Горячева, Д.Н. Гаркунов, В.В. Гриб, Д.Г. Громаковский, Б.В. Дерягин, Н.Б. Демкин, К.Л. Джонсон, Ю.Н. Дроздов, С.М. Захаров, В.В. И.Д. Ибатуллин, Измайлов, Б.И. Костецкий, И.В. Крагельский, В.И. Колесников, В.С. Комбалов, Л.И. Куксенова, В.Л. Лашхи, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин, В.Е. Панин, Л.И. Погодаев, А.С. Проников, Ю.А. Розенберг, П.А. Ребиндер, А.Г. Суслов, А.И. Свириденко, В.П. Тихомиров, Д. Тейбор, М.М. Хрущов, А.В. Чичинадзе, Л.Ш. Шустер и др.

Анализ состояния вопроса показал, что:

1. Износ подвижных сопряжений ступеней и подшипников скольжения является наиболее значимым фактором снижения ресурса установки, приводит к параметрическому отказу или отказу функционирования из-за увеличения зазора и обусловленной им динамики.

2. Эрозионный износ поверхности проточной части деталей установки влияет на изменение рабочих характеристик и в предельном случае приводит к отказу функционирования («полет»).

3. Основным методом исследования процесса изнашивания является экспериментальный, включающий испытания коротких насосных сборок, подшипников и модельные испытания материалов в воде с абразивными частицами. Отсутствует единая методология испытаний в абразивной, абразивно-коррозионной средах и научно обоснованная концепция структуры испытательных стендов.

4. Процессы изнашивания и динамические процессы исследуются отдельно без взаимосвязи между собой. Не обеспечивается физическое подобие моделей и натуральных изделий. Отсутствуют исследования изнашивания подвижных сопряжений при прецессионном вращении вала и количественные зависимости вибрации от величины износа подвижных сопряжений, что ограничивает возможность прогнозирования ресурса.

5. Не разработаны научно-методические подходы к исследованию трибологических и динамических процессов высокооборотных насосов с частотой вращения до 12000 об/мин, отсутствуют стенды для исследования трибологических процессов основных узлов и деталей: ступеней, радиальных и упорных подшипников, уплотнений, и материалов.

6. Отсутствуют комплексные исследования трибологических характеристик высоколегированных порошковых сталей, перспективных для применения в износостойких ступенях насосов.

На основе результатов анализа публикаций по рассматриваемой проблеме для реализации цели диссертационной работы **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработать модель изнашивания НС с учетом особенностей динамики, обусловленной износом сопряжений ступеней. Исследовать эволюцию изнашивания и динамики НС в абразивосодержащей жидкости.

2. Разработать модель изнашивания трибосопряжений ступеней в условиях абразивосодержащей, коррозионно-активной жидкости с учетом динамики вала.

3. Разработать комплекс испытательного оборудования для исследования процессов трения и изнашивания сопряжений ступеней, подшипников с учетом динамики вала и определения трибологических характеристик материалов.

4. Исследовать механизмы абразивного и коррозионно - эрозионного изнашивания сопряжений и проточной части ступеней, подшипников. Определить скорость изнашивания материалов в жидкости, содержащей абразив и коррозионно-активные элементы.

5. Разработать рекомендации по повышению износостойкости трибологических узлов НС и основы прогнозирования трибологического ресурса УЭЦН.

Во второй главе приведены теоретические исследования процессов абразивного изнашивания сопряжений при прецессии вала, эрозионного изнашивания поверхностей деталей и динамики системы, методология расчета предельного состояния ресурсопределяющих деталей.

Основой теоретических исследований является сочетание численных методов моделирования динамического процесса роторной системы при изменении зазоров в сопряжениях и моделирования процессов изнашивания сопряжений ступеней и подшипников с учетом формоизменения поверхности трения вследствие динамических нагрузок с применением теории подобия. Теоретические исследования направлены на изучение и описание: закономерностей изменения формы поверхности трения при прецессионном вращении вала; условий трения и взаимовлияния износа и динамики, которая определяет вид вращения вала и форму износа поверхностей сопряжения, условий наступления предельного состояния критических узлов.

Предельное состояние трибодинамической системы определяется критической величиной износа, при которой наступает либо отказ функционирования, либо параметрический отказ. Декомпозиция трибодинамической системы позволяет выделить группы подобных по условиям функционирования трибологических объектов, к которым разрабатываются отдельные методы и средства исследу-

дования, рис.2. Трибологическая подсистема включает две группы трибологических объектов, из которых одна работает в пластовой жидкости, другая – в маслозаполненном объеме.

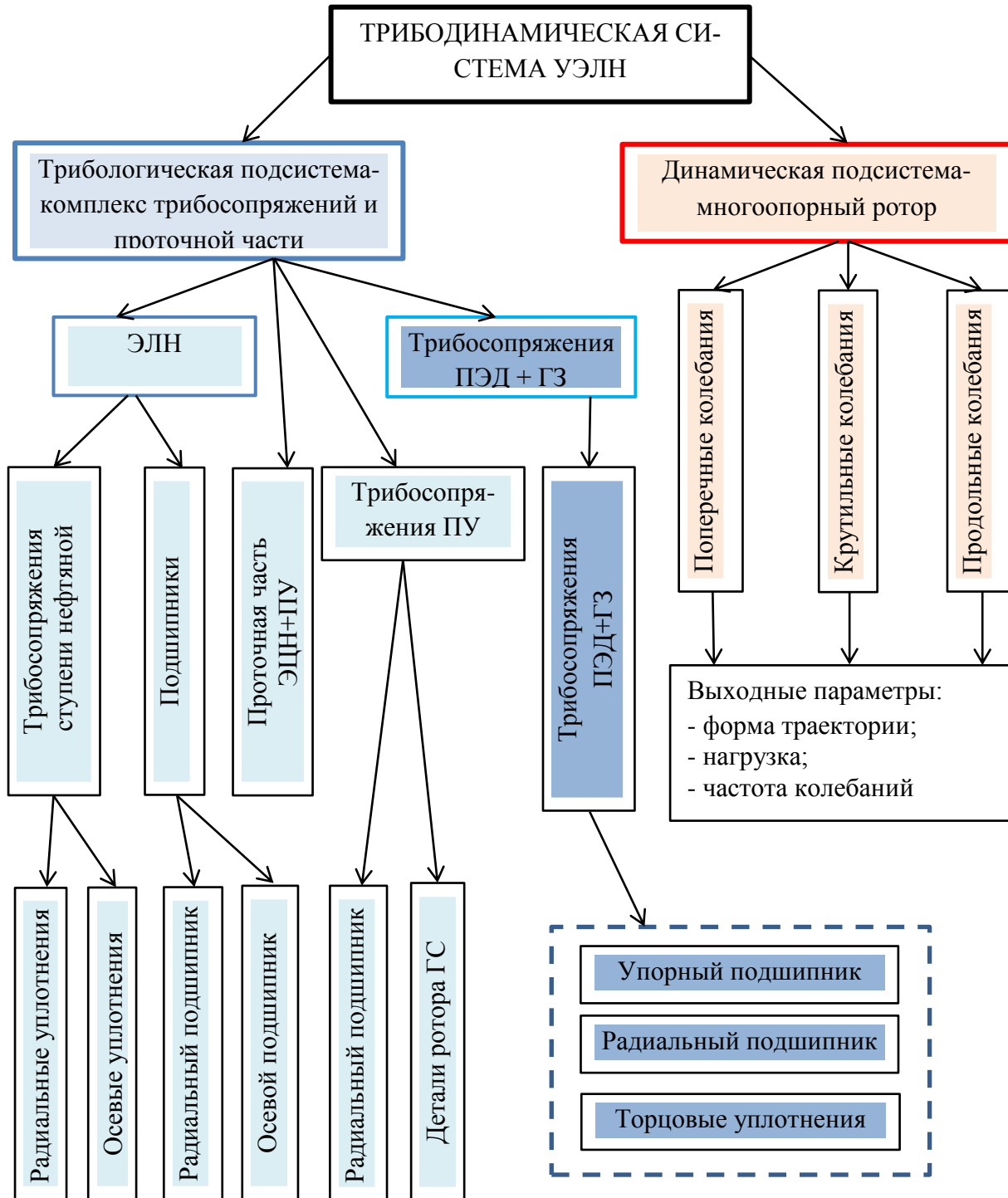


Рис. 2 - Декомпозиция трибодинамической системы: ЭЛН – электролопастной насос; ПУ – предвключенные устройства; ПЭД - погружной электродвигатель; ГС – газосепаратор; ГЗ – гидрозащита; СН – ступень нефтяная; штриховая линия – замкнутый масляный объем

Моделирование динамики установки проводили с использованием МКЭ-пакета NASTRAN с адаптацией его для решения задачи с вращающимися деформируемыми телами. Область моделирования включает в себя наиболее распро-

страненный типоразмер установки - УЭЛН5-60 и участок насосно-компрессорной трубы длиной 17м. В двух секциях установлены 384 радиальных сопряжений и соответственно рабочих колес. Предполагали, что между деталями радиальных трибосопряжений при их контакте имеется большая, но конечная контактная жёсткость втулок, рис.3. Зазор между втулкой вала и корпусом изменяется в соответствии с определённой моделью износа втулок. Силовые характеристики имеют вид пороговых функций, а для изменения зазора во времени принимается простейший закон изнашивания, который задавали в виде

$$\frac{dh(t)}{dt} = k_F F_{\tan}(t) \Leftrightarrow \frac{dd(t)}{dt} = k_F F_{\tan}(t)$$

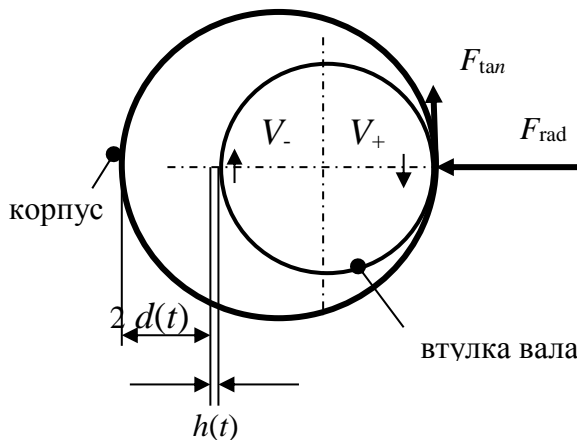


Рис. 3 - Схема контакта деталей радиального сопряжения

Принимали, что контактирующие поверхности локально цилиндрические. При контакте происходит некоторое фиктивное внедрение одной поверхности в другую на величину $v(t)$. Так как жёсткость контакта на два порядка выше локальной жесткости вала в данной точке, то внедрение пренебрежимо мало по сравнению с зазором $-|v| \ll |u|$.

Основная идея состоит в последовательном итерационном процессе, при котором в фиктивном времени производится изменение зазоров в функции от распределения радиальных реакций в сопряжениях.

При организации процесса вычислений для фиксированных значений зазоров итерациями определяется стационарная конфигурация динамической системы, рис. 4, а процесс установления является фиктивным, так как рассматривается вращение с номинальной угловой скоростью без переходного процесса разгона всей установки:

$t = t^J \quad \{d^J_i, F^J_{radi}, \dots | i = 1, \dots, 384, J = 0, 1, \dots\}$, где i – количество радиальных сопряжений в двух секциях, J – номер итерации. Условно принято, что верхнее сечение вала имеет угол поворота, равный нулю. Динамические добавки, связанные с эффектами трения малы. Далее предполагается, что система работает в таком режиме некоторое время Δt^{J+1} . Тогда зазор в каждом узле контактного взаимодействия увеличится приблизительно на величину

$$\Delta d^{J+1}_i \approx k_F F^J_{radi} \times \Delta t^{J+1}, \quad t^{J+1} \approx t^J + \Delta t^{J+1}, \quad d^{J+1}_i \approx d^J_i + \Delta d^{J+1}_i$$

Так как в течение всего контакта усилия взаимодействия распределяются неравномерно между сопряжениями, то происходит перераспределение усилий и величин зазоров, что и приводит к эволюции системы, связанной с износом.

В процессе моделирования динамики УЭЛН выявлены основные типы вращения вала: прямая асинхронная прецессия с частотой $\Omega \approx \omega/5$ и синхронная прецессия с частотой $\Omega = \omega$. Синхронная прецессия вала связана с преимущественно однонаправленным распределением дисбалансов РК вдоль оси насоса и малым уровнем демпфирования в системе.

Получено также, что изнашивание радиальных сопряжений имеет неравномерный характер по длине насоса, что связано с динамикой вала. Использование промежуточных износостойких подшипников изменяет динамику установки и уменьшает износ.

Численное моделирование при принятых допущениях не позволяет исследовать формоизменение втулок в процессе изнашивания при прецессии вала в силу большой сложности процесса, т.к. система конструктивно и геометрически нелинейна. Поэтому кинетику изменения формы втулок при изнашивании логично исследовать с использованием экспериментальных методов, для чего необходимо обеспечить подобие модельного опыта и реального процесса.

Секция является сложным объектом для моделирования с использованием теории подобия, т.к. нельзя получить полное геометрическое подобие модели из-за большого отношения длины к диаметру. Целесообразно применить аффинное подобие природы и модели. Такой вид подобия состоит в том, что масштабы подобия принимаются разными для разных координат. Если обозначить координаты точек на натурном объекте x_n, y_n, z_n , а на модели – x_m, y_m, z_m , то условия аффинного подобия:

$$x_n = ax_m; y_n = by_m; z_n = cz_m; (a = b \neq c)$$

Рассмотрим поперечные колебания стержня, описываемые комплексным уравнением $EIz^{IV} - \bar{m}r^2(\ddot{z} - 2i\omega\dot{z}) + \bar{m}\ddot{z} = 0$ (1)

Для получения условий подобия в однородное уравнение введем безразмерные отношения $I/I^0; m/m^0; a/a^0$, а также $z/c = \tilde{z}$. Здесь I^0, m^0, a^0 соответственно момент инерции сечения, погонная масса, момент инерции массы в произвольно выбранном сечении ротора, а также c – зазор в подшипнике.

Дифференцируя далее (1) по безразмерным длине $\xi/L = \tilde{\xi}$ и времени $\tau\omega = \tilde{\tau}$, где L – длина ротора, ω – частота вращения, приводим уравнение к виду

$$(EI^0/L^4 m^0 \omega^2) [(I/I^0) \tilde{z}^{IV}] - (m^0/m^0 L^2) \times [(a/a^0) \tilde{z} - 2i(a/a^0) \dot{\tilde{z}}] + (m/m^0 \ddot{\tilde{z}}) = 0$$

Таким образом, получено, что подобие динамических прогибов природы и модели соблюдается при условии равенства критериев подобия π_1 и π_2 .

$$\pi_1 = \frac{a^0}{m^0 L^2} = idem, \pi_2 = EI^0/L^4 m^0 \omega^0 = (\Omega/\omega)^2 = idem.$$

Равенство симплексов $I/I^0 = idem, m/m^0 = idem, a/a^0 = idem$ выполняется и

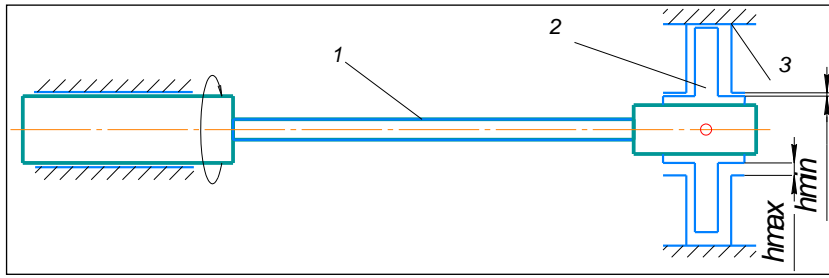


Рис. 4 - Кинематическая схема испытательного узла установки: 1-вал переменной жесткости, 2-рабочее колесо, 3-направляющий аппарат

равно единице при условии испытаний натуральных образцов деталей. Критерий подобия π_2 является основным и характеризует гибкость ротора. Для реализации условий подобия модели и природы $\pi_2 = idem$ необходимо уменьшить ли-

нейный размер L и жесткость EI за счет уменьшения диаметра вала, рис.4. Насосные секции являются основными источниками динамических нагрузок, связанных с износом трибосопряжений, нестационарными процессами в пластовой жидкости.

Износостойкость насосной секции определяется износостойкостью комбинации СН и промежуточных подшипников. Поэтому ее можно представить в виде мультипликативной зависимости средней скорости изнашивания ступени \bar{v}_i и конструкторско-технологических факторов:

$$\bar{v}_{нс} = A \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \cdot k_{дин} \cdot k_{a_i} \cdot k_k \quad (2)$$

где: A – коэффициент согласия; v_i – скорость изнашивания ступени; $k_{дин}$ – динамический фактор; k_{a_i} – коэффициент влияния абразива по длине секции; k_k – конструкторный фактор; N – количество ступеней в секции. Динамический фактор $k_{дин}$ характеризует форму изгиба вала при вращении и, соответственно, изменение износа радиальных трибосопряжений h по длине секции x . Эта зависимость в общем случае имеет вид $h(x) = a + \sum_m^n \left(a_m \cos \frac{\pi n l}{L} + b_m \sin \frac{\pi n l}{L} \right)$, где n – порядковый номер ступени; l – высота ступени; L – длина полуволны основной гармоники колебаний или расстояние между подшипниками, $x = \pi n l$. Коэффициент k_a характеризует изменение режущих свойств абразива вследствие его дробления в трибосопряжениях по длине секции и вычисляется по формуле $\varepsilon_{p_N} = \varepsilon_{p_0} \left(1 - \frac{q_y}{Q} \right)^N$, где: ε_{p_0} – исходная концентрация, %; q_y – утечка через уплотнение i -ой ступени.

Износостойкость ступени v_i определяется скоростью изнашивания радиальных сопряжений v_r , скоростью изнашивания осевых сопряжений v_o и скоростью эрозионного изнашивания v_3 сопряжений и проточной части.

Общий износ h_{Σ} сопряжений можно представить в виде суперпозиции абразивного износа h_a и эрозионного износа h_3 : $h_{\Sigma} = h_a + h_3$. Износ h_a радиальных сопряжений установки в общем виде зависит от ряда факторов.

$$h = f(\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p, T, \nu, k_{HCl}, Q, H, n, H_M E_M, t),$$

где: $\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p$ – соответственно концентрация, размер, коэффициент формы и твердость абразивных частиц; T, ν, k_{HCl} – температура, вязкость и коррозионная активность жидкости; Q, H – подача, напор; n – частота вращения; H_M, E_M – твердость и модуль упругости материала сопряжения, t – время.

Процесс изнашивания радиальных сопряжений ступеней и подшипников рассматриваем для случая нестационарного контакта в плоской постановке, когда вал вращается со скоростью ω вокруг своей оси O_2 , а ось вала вращается с угловой скоростью Ω вокруг оси отверстия O втулки, рис.5, т.е. реализуется синхронная прецессия.

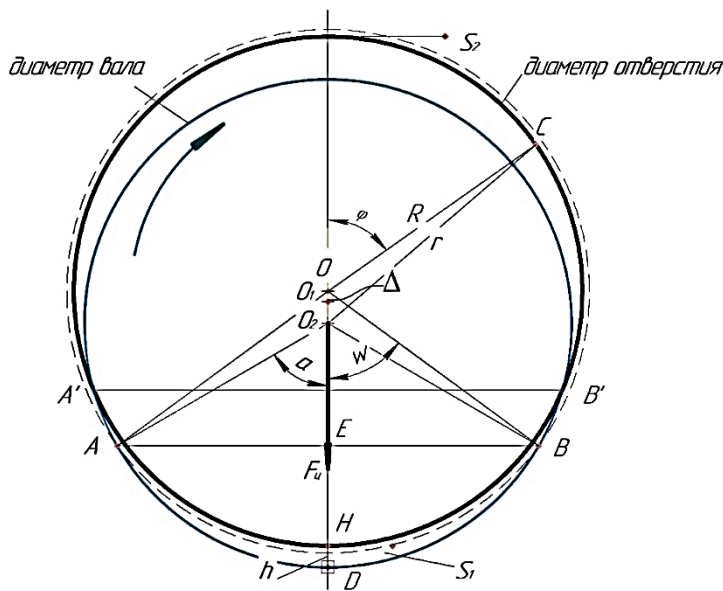


Рис. 5 - Расчетная схема износа радиального сопряжения при синхронной прецессии

Под действием центробежной силы F_c , приложенной к центру вала O_2 , вал прижимается при вращении к поверхности отверстия втулки в точке H . При этом формируется односторонний износ вала и равномерный износ отверстия втулки. При износе вала на величину h детали контактируют по дуге $A'B'$. При одновременном износе вала на величину h и втулки на величину $h_{вт}$ контакт происходит по дуге AB . Углы α

и w характеризуют длину контакта деталей.

Принимаем, что для одноименных материалов масса изношенного материала вала m_e равна массе изношенного материала ответной детали m_o . Очевидно, что массы износа в этом случае пропорциональны площадям S_1 и S_2 .

Площадь поперечного сечения области износа вала рассчитывается по формуле

$$S_1 = \frac{r^2}{2} [2\alpha - \sin 2\alpha] - \frac{(r+\Delta r)^2}{2} [2w - \sin 2w]; \quad S_2 = 2\pi(r + \Delta r)h_2,$$

где: r – радиус вала, м; h_{max} – максимальная величина износа вала; Δ – первоначальный радиальный зазор. Введем относительные величины $\delta = h_{max}/r$; $\sigma = \Delta/r$. Угол α можно определить по формулам:

$$\alpha = \arccos \frac{2\sigma - 2\sigma\delta - \delta^2}{2(\sigma + \delta)} \quad (3)$$

Расчеты показали, что уже при небольших величинах износа втулки $\sim 0,05$ мм и величине абразивной частицы $0,05$ мм угол α имеет значительную величину $130\dots 140^\circ$.

Принимая в качестве гипотезы деформационную модель разрушения поверхностей трения при абразивном изнашивании, величину износа деталей сопряжения рассчитываем по формуле:

$$h_{a_{1,2}} = \frac{0,58\sigma^{1,5}R^{1,5}2\alpha \cdot r_{1,2}}{H_M^{1,5}\delta^t A_{a_{1,2}}} \cdot Q \cdot t \cdot \varepsilon_{pN} \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R^3}, \quad (4)$$

где: σ , H_M , ρ – соответственно предел текучести, твердость и плотность материала радиального сопряжения; δ – относительное удлинение материала при разрыве; t – коэффициент усталости материала при пластических деформациях, R – радиус частиц, $A_{a_{1,2}}$ – площадь изнашиваемой поверхности деталей сопряжения.

Процесс эрозионного изнашивания развивается в сопряжениях после абразивного изнашивания и в проточной части. В обоих случаях имеет общие закономерности. Линейная величина износа $h_э$ определяется по формуле

$$h_э = v_э \cdot A_э \cdot t = \frac{I_э m_a}{A_э \rho}, \quad (5)$$

где: $I_э = m_M/m_a$ – интенсивность эрозионного изнашивания; m_M , m_a – соответственно масса изношенного материала и масса абразивных частиц, $A_э$ – площадь поверхности износа. Принимая в качестве гипотезы деформационную модель разрушения поверхностей трения при эрозионном изнашивании, интенсивность изнашивания рассчитываем по формуле:

$$I_{э_д} = \lambda_F A_{д1} \rho \frac{\rho_p^{1/2} R^3 w_p^3 \sin^3 \theta}{H_V^{3/2}}, \quad (6)$$

где: θ – угол соударения частиц с поверхностью, w_p – скорость частиц, $A_{д1}$ – коэффициент согласия, H_V – твердость материала, ρ_p , R – плотность и размер абразивных частиц, λ_F – коэффициент формы частиц.

Для определения скорости изнашивания промежуточных подшипников используется зависимости (2) и (4) с соответствующей заменой геометрических размеров и свойств материалов.

Процесс изнашивания сопряжений при определенных условиях приводит к возникновению предельного состояния, заключающегося в исчерпании ресурса деталей насоса. Наиболее критичными в этом смысле являются разрушение фланцевого соединения корпуса ЭЛН и вала вследствие динамических нагрузок, вызванных износом сопряжений и предельное увеличение зазоров в уплотнениях ступеней. Решение задачи динамики УЭЛН с учетом износа сопряжений позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние критичных узлов. Для расчета износа используются полученные зависимости (2), (4), (6).

В третьей главе приведена концепция разработки комплекса испытательных стендов, рис.6, на основе единых подходов конструирования, с использованием в качестве базовой системы измерения и обработки результатов программно-аппаратного продукта фирмы National Instruments, описаны их конструктивные особенности и характеристики. В качестве объектов для испытаний выбраны: насосная секция, ступень нефтяная, подшипник секции, гидродинамический подшипник гидрозащиты (ГЗ), торцовые уплотнения, материалы деталей. Методика предполагает использование технологии ускоренных испытаний ресурсопределяющих натуральных деталей и узлов, материалов в абразивосодержащей, коррозионно-активной среде, максимально соответствующей свойствам реальной пластовой жидкости.



Рис. 6 - Структура стендов и методик для исследования трибодинамической системы: 1,2,3-насосные секции; 4-входной модуль-газосепаратор; 5-гидрозащита; 6-электродвигатель

Стенды для исследования трибодинамических процессов насосных секций разработанные в горизонтальном, рис.7а, и вертикальном, рис.7б, исполнениях, совместно с ОАО "Алнас" и ООО "Алмаз", позволяют проводить испытания НС 5-го и 5А габаритов различной производительности с условной длиной 3...5м. Цель испытаний: исследование зависимости величины вибрации корпуса от из-

носа радиальных и осевых сопряжений ступеней $V = V(h_r, h_o)$ и подшипников, определение изменения износа по длине секции $h(x)$, получение зависимости скорости изнашивания радиальных сопряжений от концентрации абразива

$\overline{v}_{НС} = \overline{v}_{НС}(\varepsilon_p)$, а также исследование влияния типоразмера секции на динамику (конструкционный фактор k_k). На стендах реализована замкнутая схема циркулирования модельной жидкости - "вода + кварцевый песок". В опытах регистрируют деградацию напорно-расходной характеристики (изменение подачи, напора, температуры, момента), виброускорение. Испытуемая НС устанавливается в ложе-ментах станины по концевым фланцам. Вибрация корпуса НС на горизонтальном стенде измеряется в восьми точках и в трех точках на вертикальном стенде. Изме-

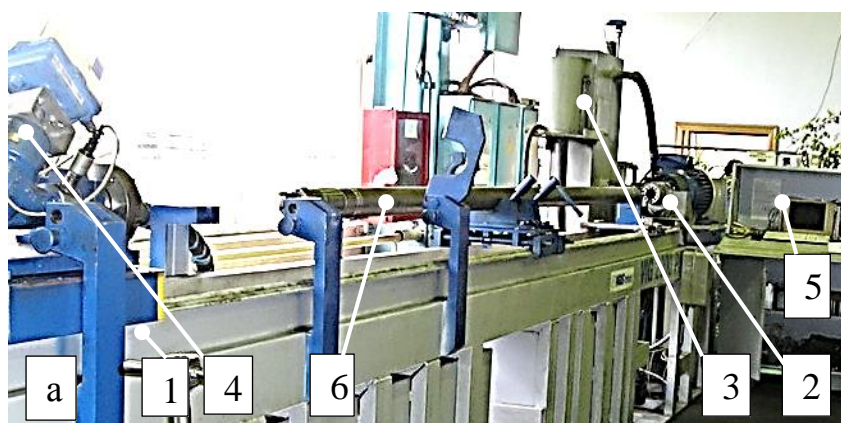


Рис. 7 - Общий вид стендов – а) горизонтальный стенд (теплообменник не показан): 1-станина, 2-привод с измерителем момента, 3-емкость-смеситель, 4-узел измерения подачи, напора, температуры, 5 –система управления, 6-испытуемая секция; б) вертикальный стенд: 1-станина; 2-привод с измерителем момента; 3-испытуемая секция; 4-сепаратор частиц; 5- узел измерения подачи, напора, температуры, 6-дозатор абразива

рение износа проводится после разборки НС. Охлаждение модельной жидкости осуществляется с помощью специального теплообменника. В качестве абразива используется кварцевый песок, который добавляется в жидкость парциально на горизонтальном стенде и непрерывно на вертикальном стенде.

Для исследования трибологических процессов в ступенях и подшипниках при прецессионном вращении вала разработаны стенды с подачей до $120 \text{ м}^3/\text{сут}$, рис.8, и с подачей до $500 \text{ м}^3/\text{сут}$, рис.9. В качестве модельной жидкости использовали состав "вода + абразивные частицы и/или соляная кислота" – первый стенд и " вода + абразивные частицы" – второй стенд. Измеряемые параметры: подача, напор, момент сопротивления, температура. На стенде до $120 \text{ м}^3/\text{сут}$ применяется замкнутая и разомкнутая схема циркулирования модельной жидкости (с сепаратором абразивных частиц и дозатором). Основные параметры первого стенда: частота вращения максимальная – 6000 об/мин , температура максимальная – 90°C ,

подача СН – $15 \dots 120 \text{ м}^3/\text{сут}$. Принципиальным отличием стенда является возможность воспроизводить на нем реальную кинематику вращения вала с РК, в частности прецессию, измерять траекторию центра масс РК. Первое обеспечивается валом переменной жесткости, рис.4, второе - индуктивными датчиками положения. На стенде устойчиво воспроизводится односторонний износ втулок радиальных сопряжений в режиме синхронной прецессии.

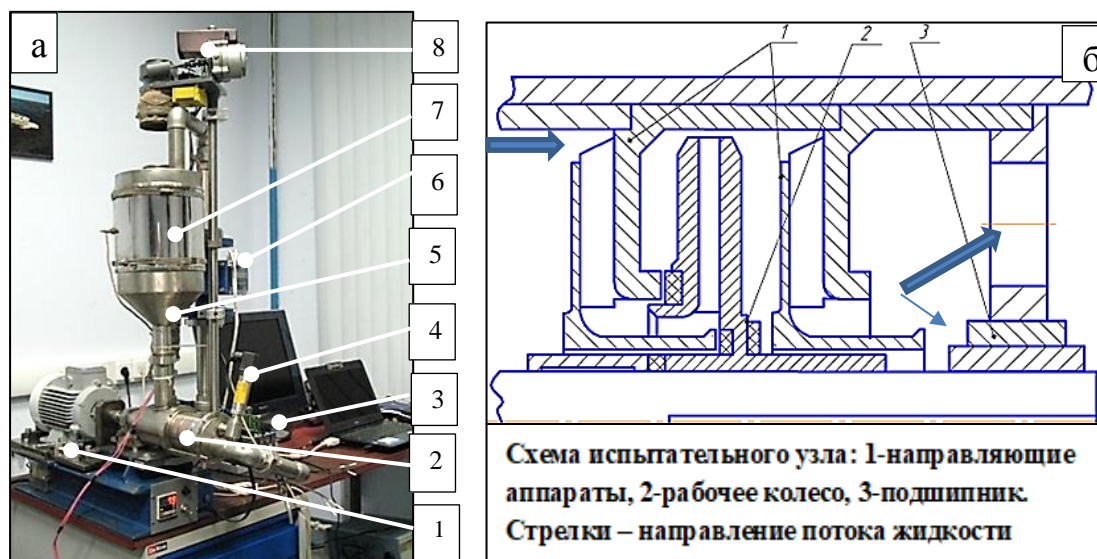


Рис. 8 - Испытательный стенд для СН: а - общий вид: 1-электропривод с датчиком момента; 2-испытательный узел; 3-система сбора данных; 4-датчик давления; 5-емкость-смеситель; 6-расходомер; 7-нагревательный элемент; 8-дозатор абразива; б – схема испытательного узла

На стенде с подачей до $500 \text{ м}^3/\text{сут}$ реализована замкнутая схема циркулирования модельной жидкости и имеется возможность воспроизводить реальную кинематику вращения вала с РК, в частности прецессию. Основные параметры стенда: частота вращения максимальная 4500 об/мин, типоразмер СН – 5,5А с подачей $80 \dots 500 \text{ м}^3/\text{мин}$, температура до 90°C . Измеряемые параметры: подача, напор, момент сопротивления, температура. Стенды позволяют производить измерение осевой силы ступени в зависимости от подачи жидкости, для чего используется специально разработанное измерительное устройство, устанавливаемое в испытательном узле стендов, рис.8,б.

Для исследования процессов трения в осевом гидродинамическом подшипнике погружного электродвигателя и ГЗ разработан стенд, рис.10, позволяющий проводить опыты с подшипниками диаметром $40 \dots 100 \text{ мм}$ с изменением частоты вращения, осевой силы и температуры рабочей жидкости. Испытания проводятся в замкнутой камере с маслами типа МДПНс или иностранными аналогами с измерением температуры поверхностного слоя подпятника, момента сопротивления. Стенд обеспечивает: величину осевой силы до 22000Н (пневмосистема) и до 50000Н (гидросистема), температуру масла до 220°C , частоту вращения – 4500об/мин (10000 об/мин – с мультипликатором). В качестве критериев работоспособности используется коэффициент трения, предельная нагрузка заедания.

Стенд для исследования процесса эрозионного (гидроабразивного) изнашивания материалов ступеней и подшипников, рис.11, выполнен по схеме центробежного ускорителя с замкнутым контуром течения жидкости и разомкнутым контуром движения абразива, в результате чего сохраняются его начальные свойства в течение опыта. После воздействия на образец абразив сепарируется. Используется модельная жидкость: "вода+абразив" или "вода+абразив+HCl".

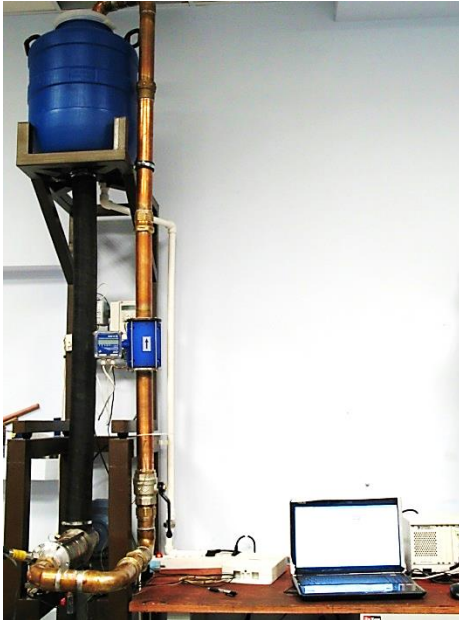


Рис. 9 – Испытательный стенд для СН с подачей до $500\text{м}^3/\text{сут}$

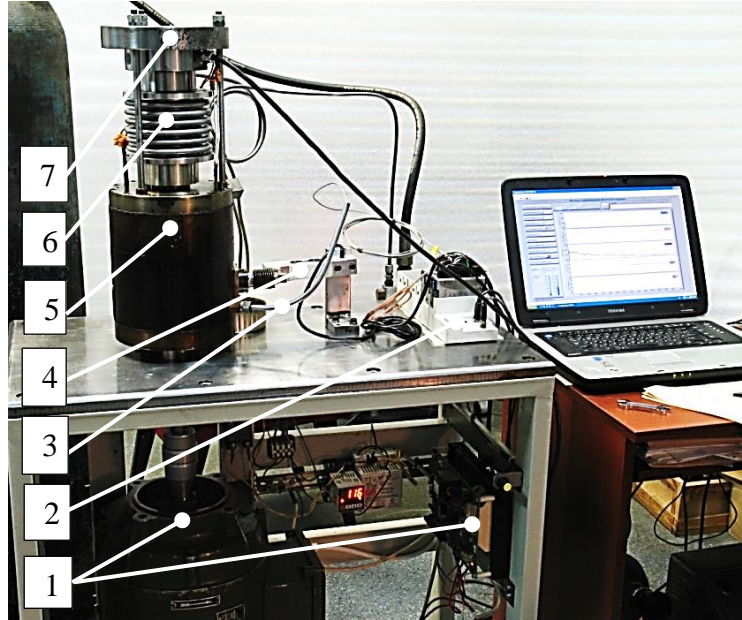


Рис. 10 - Испытательный стенд для осевого подшипника:
1-привод; 2-система измерения; 3-датчик температуры;
4-датчик момента; 5-камера; 6-пневмопоршень;
7-датчик осевой силы

Основные параметры: скорость струи максимальная – 25 м/с , температура модельной жидкости $25\dots 80^\circ\text{C}$, угол соударения струи $\theta - 30\dots 90^\circ$, количество образцов в опыте 2, 4.

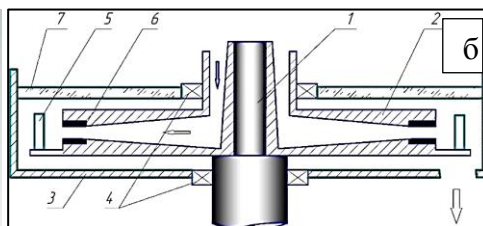
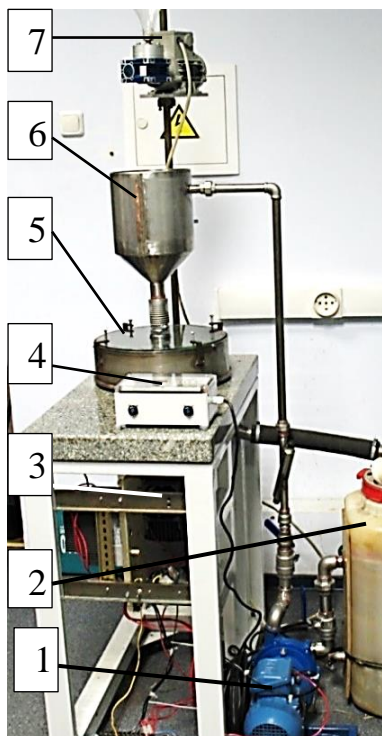


Рис. 11 – Стенд для исследования процесса эрозионного изнашивания: (а)- 1-насос, 2-сепаратор абразива, 3-привод, 4-датчик расхода, 5-испытательный узел, 6-смеситель, 7-дозатор; (б) – схема испытательного узла – 1-вал, 2-ротор, 3-камера, 4-уплотнение, 5-образцы, 6-сопла, 7-крышка. Стрелки показывают направление движения жидкости

Скорость подачи абразива регулируется дозатором. Скорость частиц w_p рассчитывается на основе измерений расхода жидкости через сопло. В качестве критерия износоустойчивости используется интенсивность эрозионного изнашивания $I_э$.

В четвертой главе приведены результаты

экспериментальных исследований трибосопряжений ступеней, подшипников промежуточных и осевых гидродинамических, а также технологии повышения износостойкости. Испытания сопряжений СН и подшипников проводили в средах "вода + абразив" или "вода + абразив + НС1" в разных концентрациях с использованием стендов, рис.8, 9. Исследование кинетики изнашивания радиальных сопряжений ступени в условиях прецессии вала показало, что имеет место два участка износа сопряжения – абразивный и эрозионный износ, рис.12а. Абразивное изнашивание сопровождается отклонением вала, увеличением зазора и

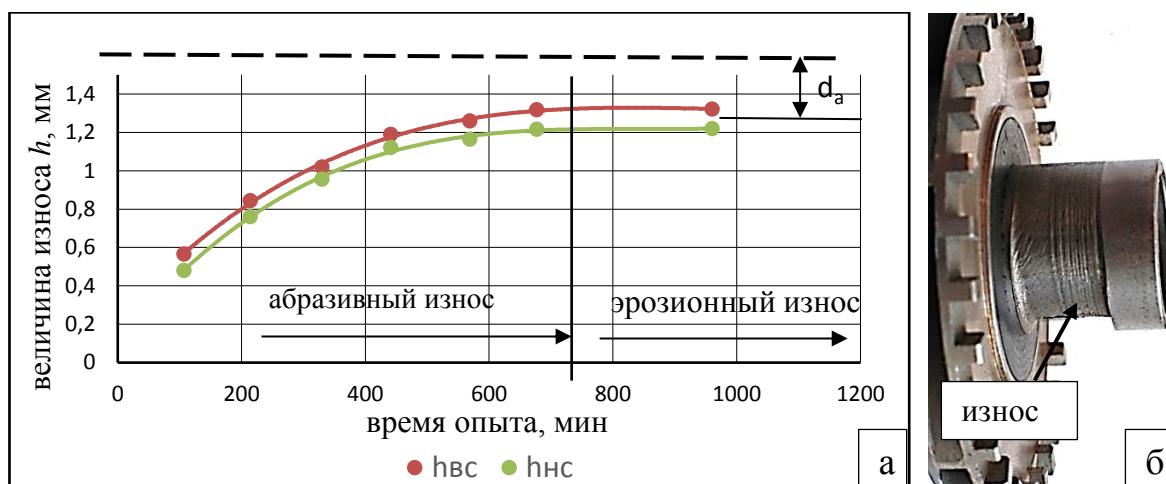


Рис. 12 - Кинетика изнашивания радиальных сопряжений ступени 5-50: а) - (h_{vc} , h_{nc} – износ верхнего и нижнего сопряжения), б) - односторонний износ ступицы РК

формированием одностороннего износа ступицы РК, рис.12б. Затем происходит ограничение изгиба вала в зависимости от критерия $\pi_2 = \Omega/\omega$ (штриховая линия на рис.12) и смена механизма изнашивания при выполнении условия $\Delta_{min} > d_a$, т.е. когда минимальный зазор в сопряжении превысит максимальный размер абразивных частиц d_a . Выявлено сильное влияние концентрации абразива на скорость изнашивания в соответствии с зависимостью $v_r = 0,0001\varepsilon_p$, мм/мин, и дисбаланса РК. Влияние типоразмера ступени на износ сопряжений рекомендуется учитывать коэффициентом 1,5. Выявили слабую зависимость скорости изнашивания радиальных и сильную зависимость осевых сопряжений от НРХ, которая описывается выражением $v_o = v_{on}(Q/Q_n)^{-3/4}$, где v_{on} – скорость изнашивания при номинальной подаче Q_n . Получена зависимость скорости изнашивания осевых сопряжений от величины осевой силы p_o - $v_o = 4 \cdot 10^{-8}p_o + 0,0003$ и концентрации абразива в жидкости - $v_a = 0,0003\varepsilon_p$, мм/мин.

Выявлено, что на величину осевой силы влияют: конструкция ступени, вязкость жидкости, зазоры в сопряжении, особенно обусловленные износом, частота вращения. Оребрение диска РК, балансирные отверстия снижают величину осевой силы. Осевая сила ступени, работающей в масле, меньше, чем в воде и изме-

няется в квадрате от частоты вращения. Зависимость осевой силы от НРХ для основных типов ступеней определена экспериментальным путем, рис.13.

Средние значения скорости изнашивания радиальных сопряжений из основных материалов при испытаниях в воде с абразивом соотносятся: серый чугун / Ni-Resist / порошковые стали: 1 / 0,64 / 0,34.

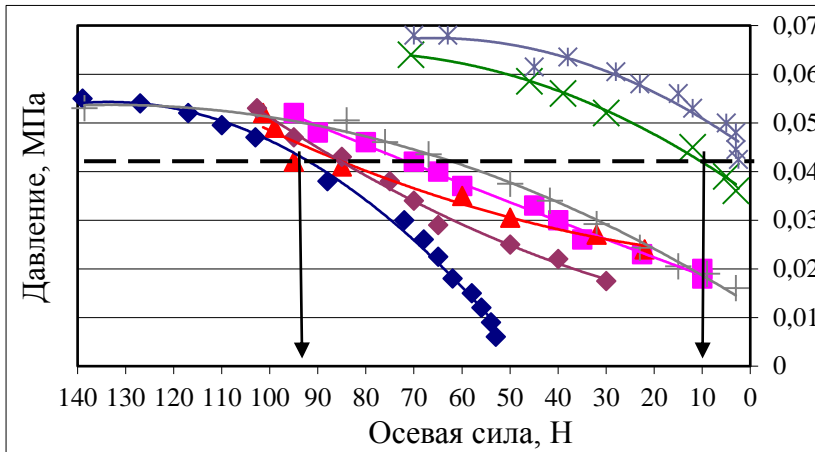


Рис. 13 - Зависимость осевой силы ступеней от НРХ при испытаниях в воде

тавливаются из высокотвердых материалов – твердых сплавов, керамики. В результате испытаний 160 подшипников WC-Co, SiC, ZrO₂, SiC-релит на стенде для СН, рис. 12, с концентрацией кварцевого песка 1,2...10г/л получена обобщающая зависимость скорости изнашивания подшипников из WC-Co от концентрации кварцевого песка, рис.14, которая описывается линейной функцией $v_{\text{под}} = 3 \cdot 10^{-6} k_a$, мм/мин с $R^2 = 0,9301$. Выявлена тенденция увеличения скорости изнашивания подшипников из твердых сплавов с увеличением частоты вращения – при увеличении в 1,9 раза $v_{\text{под}}$ увеличивается ~ на 30%. Выявлено, что износостойкость подшипников из WC-Co соответственно в 18,1 и 14,6 раз выше, чем подшипников из SiC и ZrO₂ по причине низкой трещиностойкости.

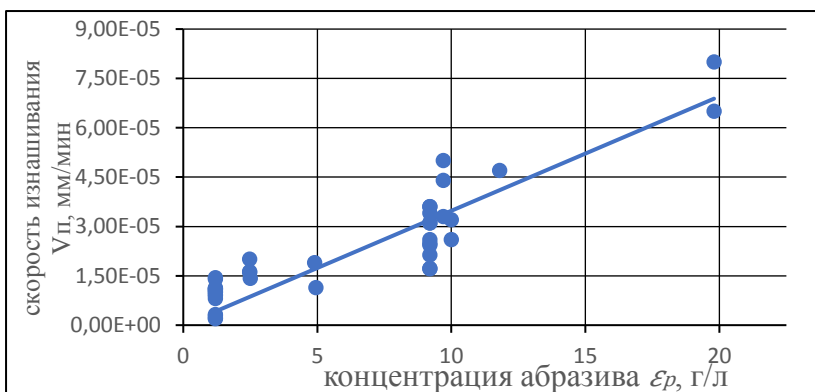


Рисунок 14 – Зависимость скорости изнашивания подшипников WC-Co от концентрации абразива

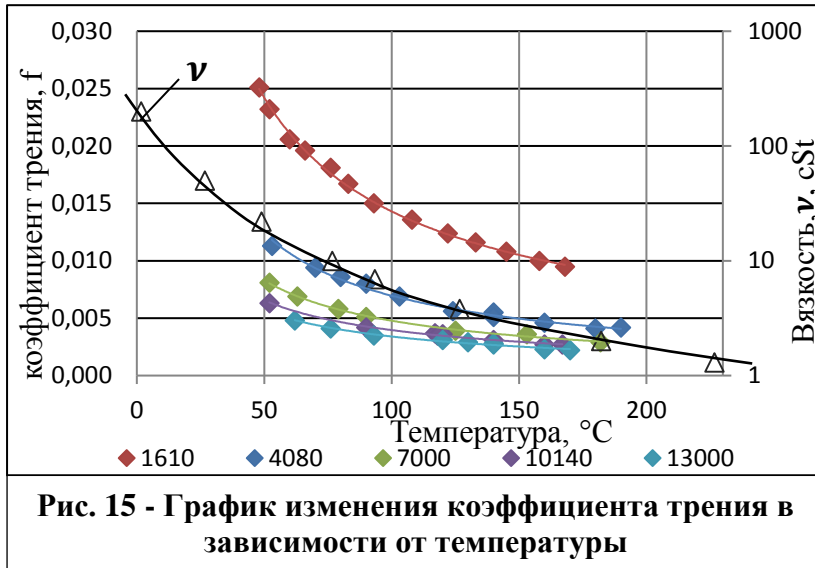
других материалов в маслах МДПНс и фирмы REDA в температурном диапазоне 170...220⁰С с целью определения предельного состояния по величине осевой си-

Влияние частоты вращения в диапазоне 3000...6000 об/мин на скорость изнашивания радиальных сопряжений основных типов ступеней можно оценить выражением: $k_k = (n_1/n_2)^{(1,5...2,0)}$.

Износостойкие подшипники используются для уменьшения износа радиальных сопряжений СН и изготавливаются из высокотвердых материалов – твердых сплавов, керамики. В результате испытаний 160 подшипников WC-Co, SiC, ZrO₂, SiC-релит на стенде для СН, рис. 12, с концентрацией кварцевого песка 1,2...10г/л получена обобщающая зависимость скорости изнашивания подшипников из WC-Co от концентрации кварцевого песка, рис.14, которая описывается линейной функцией $v_{\text{под}} = 3 \cdot 10^{-6} k_a$, мм/мин с $R^2 = 0,9301$. Выявлена тенденция увеличения скорости изнашивания подшипников из твердых сплавов с увеличением частоты вращения – при увеличении в 1,9 раза $v_{\text{под}}$ увеличивается ~ на 30%. Выявлено, что износостойкость подшипников из WC-Co соответственно в 18,1 и 14,6 раз выше, чем подшипников из SiC и ZrO₂ по причине низкой трещиностойкости.

Впервые проведены испытания осевых гидродинамических подшипников 21 конструктивного исполнения отечественных и зарубежных компаний из SiC, баббита, бронзы, с покрытиями РЕЕК,

лы. Выявили, что наибольшей несущей способностью обладают подшипники сборной конструкции с сегментами из бронзы Cu83Sn7Zn3Pb7. Максимальная удельная нагрузка в опытах составила 24,42МПа, коэффициент трения 0,0023 при температуре 170⁰С и 0,0019 – при температуре 220⁰С. Осевые подшипники с самоустанавливающимися сегментами и напеченным покрытием РЕЕК также являются перспективными для применения в УЭЛН. Максимальная удельная нагрузка



в опытах составила 20,0МПа, коэффициент трения 0,003 при температуре 170⁰С и 0,0043 – при температуре 220⁰С. Зависимость коэффициента трения от температуры имеет похожий вид, рис.15, для всех типов подшипников. Различия заключаются в величине коэффициента трения. Осевые подшипники из керамики ха-

рактируются высокими коэффициентами трения до 0,04 на этапе предразрушения. Подшипники с напеченным покрытием РЕЕК и самоустанавливающимися сегментами наиболее перспективны для использования в УЭЛН – имеют высокие нагрузочные характеристики, но несколько более высокие значения коэффициента трения. Для оптимизации состава РЕЕК разработаны покрытия, изготовленные из смеси порошка с разным молекулярным весом РЕЕК 150, 380, 450; графита С-2, ПТФЭ Ф-4НТД и проведены испытания образцов "кольцо-кольцо". На основании результатов опытов получено, что наибольшей износостойкостью обладает покрытие на основе РЕЕК450.

Испытания более 70 подшипников в широком диапазоне нагрузок и температуры позволили выделить трибодинамический фактор, влияющий на ресурс, заключающийся в резком увеличении коэффициента трения при изменении величины осевой силы.

В пятой главе приведены результаты исследования эрозионного и коррозионно-эрозионного изнашивания ступеней и материалов при различных типах абразива, коррозионно-активной среды и температуры, а также условий возникновения локального разрушения ("промыв"). В качестве основного показателя износостойкости ступени использовали среднюю скорость коррозионно-эрозионного изнашивания $v_{кэ}$ материала проточной части ступени: $v_{кэ} = \frac{\Delta M - \Delta m}{t \cdot \rho \cdot S}$, [мм/мин·мм²], где ρ - плотность материала [мг/мм³], s - площадь поверхности

омываемой потоком жидкости [мм²], t – время опыта [мин], ΔM – общее изменение массы детали [г], Δm – изменение массы вследствие износа сопряжений, [г].

Установили, что тип и размер абразивных частиц принципиально влияют на область появления локального разрушения НА. Крупные частицы пропанта производят интенсивный износ гильзы НА в зоне изменения направления потока и торможения – на входных кромках лопаток НА и РК, и в замковой части. Более мелкие частицы корунда производят разрушение преимущественно поверхности дисков НА и РК и зоны перехода диска в гильзу. Износ деталей ступени изменяется в зависимости от скорости в степени 2,6...2,9.

Испытания ступеней типоразмера 5-50 из десяти различных материалов: серого чугуна, чугуна Ni-resist, порошковых сталей, полимеров, легированных сталей в среде "вода + кварцевый песок (10г/л) + HCl (3,5%)" при температуре 80⁰C показали, что наибольшее влияние выбранные условия опытов оказывают на изнашивание проточной части ступени. Скорость изнашивания сопряжений ступени в зависимости от материала изменяется существенно меньше. Это объясняется тем, что при абразивном изнашивании сопряжений важное значение имеет твердость, которая для этих материалов изменяется в небольшом диапазоне HV₁₀₀ 247...505. Скорость коррозионно-эрозионного изнашивания проточной части в значительной степени зависит от коррозионной стойкости материала, количества легирующих элементов. На основании результатов проведенных опытов с 10 различными материалами получена зависимость скорости изнашивания от количества легирующих элементов (Ni+Cr+Mo), рис.16. Результаты аппроксимируются экспоненциальной зависимостью: $v_{кэ_{НА}} = 0,001e^{-0,147k_{кэ}}$ с $R^2 = 0,8452$, где $k_{кэ}$ – содержание легирующих элементов, %. Замечено, что скорость коррозионно-эрозионного изнашивания у НА выше в два раза чем у РК, что подтверждается

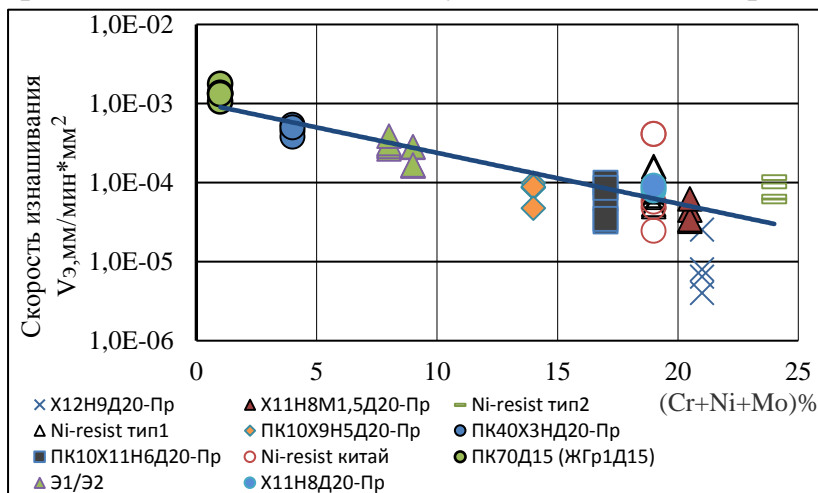


Рис. 16 - Зависимость скорости коррозионно-эрозионного изнашивания НА от содержания легирующих элементов

эксплуатационными наблюдениями. Выявили сильное влияние температуры модельной жидкости на изнашивание: увеличение температуры жидкости с концентрацией HCl 4,6% в два раза, с 40 до 80⁰C, приводит к изменению массы деталей из чугуна Ni-resist – в 8,5 ... 14,5 раз. Наибольшей износостойкостью в этих условиях обладает высоколегирован-

ная порошковая сталь X16H9D20-Pr и чугун Ni-resist, тип 4. Анализ измеренных анодных поляризационных кривых указывает на высокую коррозионную стойкость этих материалов. Полученные результаты можно использовать при разработке новых материалов – порошковых сталей, а также при определении предельных условий эксплуатации оборудования.

Исследование процесса коррозионно-эрозионного изнашивания материалов проводили в диапазоне скоростей струи 6,9...16 м/с, с использованием кварцевого песка, корунда и проппанта различных фракций. В качестве образцов использовали порошковые стали, чугуны Ni-Resist, легированные стали, твердые сплавы WC-Co, высоколегированные сплавы, износостойкие покрытия, нанесенные HVOF и D-gun процессами.

Исследование морфологии поверхности износа порошковых сталей и чугунов позволили выделить два основных механизма поверхностного разрушения – деформационный износ и микрорезание. Наибольшее влияние на развитие процесса оказывают скорость частиц, табл.1, и характер абразива. Показатель степени, характеризующий влияние скорости частиц на I_3 , находится в диапазоне 2,6...2,7, что коррелирует со значением, полученным при испытании ступеней. У твердых сплавов реализуется механизм усталостного разрушения. Влияние размера частиц d_a на I_3 описывается степенной зависимостью $I_3 = Ad_a^n$.

Таблица 1-Зависимость интенсивности изнашивания от скорости потока и угла воздействия корунда размерности F24

Материал	$I_3 \times 10^6$, г/г (скорость струи 16 м/с)		$I_3 \times 10^6$, г/г (скорость струи 11 м/с)		Показатель степени при V
	Угол установки образца – 45°	Угол установки образца – 90°	Угол установки образца – 45°	Угол установки образца – 90°	
1 - ПК70Д15	21,3...21,6	17,1...17,7	7,5...7,9	6,3...6,9	2,6...2,7
2 - ПК90Н4МГ2КД15	17,9...18,0	20,1...21,0	6,7...7,0	7,2...7,5	2,6...2,7
3 - ПК10X16H9D20	19,4...20,1	16,1...16,8	7,1...7,2	5,9...6,1	2,6...2,7
4 - ПК10X7H4D20	19,4...20,3	17,2...17,8	7,2...8,3	6,2...6,9	2,6...2,6

Для порошковых сталей и чугуна Ni-Resist при скорости струи 10 и 16 м/с значения $A = (7 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5})$ и $n = (0,3336 \dots 0,4969)$. Выявлено влияние типа абразива: корунд и проппант изнашивают порошковые стали соответственно в 4,4...4,6 и в 6...4,3 раз интенсивнее чем кварцевый песок одинаковой размерности.

В главе 6 изложены результаты экспериментальных исследований трибологических и динамических процессов НС с использованием стендов, рис.7а,б, в абразивосодержащей среде. Испытали 26 насосных секций длиной 3...5м, типоразмера 5, 5А в диапазоне подач 25...500 м³/сут. Время каждого опыта изменяли от 6 до 48 часов в зависимости от типа объекта.

При испытаниях секций со ступенями из порошковых сталей, РК которых имеют минимальный дисбаланс, наблюдали корреляцию между изменением изно-

са радиальных сопряжений и виброскоростью по длине секции, рис.17. Форма износа трибосопряжений ступеней – равномерная, что свидетельствует о асинхронной прецессии вала. Вибрацию измеряли в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Первоначальный уровень виброскорости секции ~ 2,5 мм/с. При достижении суммарного износа радиальных сопряжений 0,68 мм виброскорость увеличилась до 17,5 мм/с.

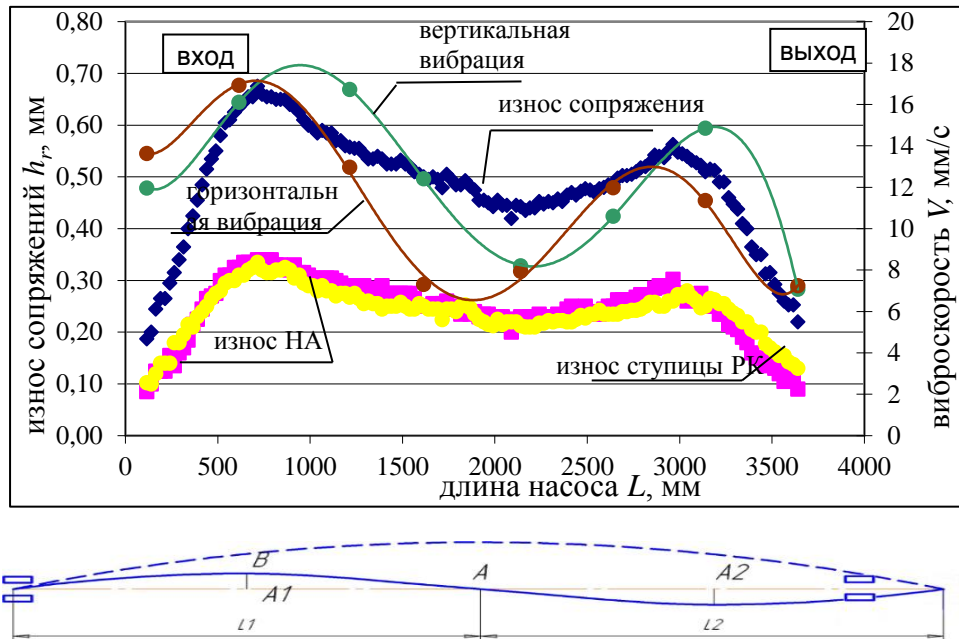


Рис. 17 - Распределение износа радиальных сопряжений и виброскорости по длине НС и предполагаемая форма упругой линии вала (нижний рисунок)

ношенного насоса. На последней стадии износа появились два новых пика 22,2 и 27,7 Гц. Кинетика виброскорости, рис.18, имеет медленный рост значений в течение 2/3 времени, а затем экспоненциальное увеличение.

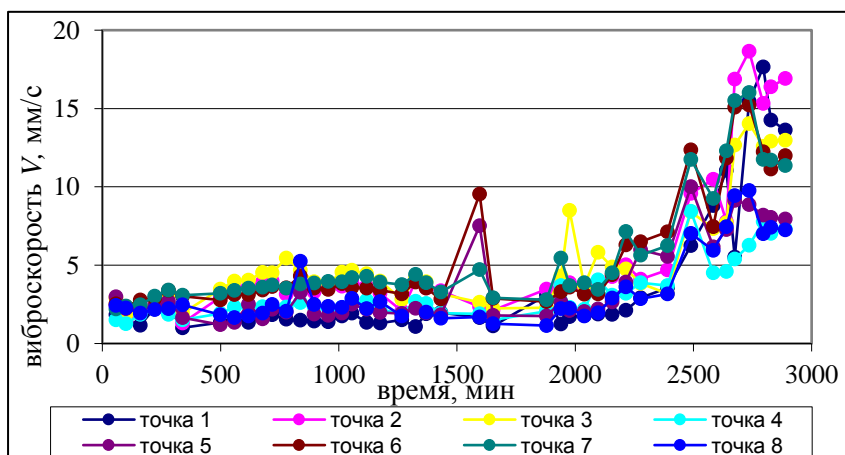


Рис. 18 - Кинетика виброскорости НС при изнашивании

Установили, что односторонний износ втулок радиальных сопряжений связан с синхронной прецессией вала, которая возникает при увеличенном исходном дисбалансе РК, локально одностороннем его расположении по длине вала и повышенном износе концевых деталей, который обусловлен несоосностью валов в шлицевых муфтах и возбуждает высокие уровни вибрации вплоть до их поломки. Максимальное значение виброскорости при этом в конце опыта 70 мм/с, что в 28 раз выше исходных значений.

Измеренные частоты собственных колебаний - ниже оборотной частоты: 8,8 Гц - первая гармоника, 29,5 Гц - вторая гармоника. При определенной величине износа радиальных сопряжений - проявляется частота 24,9 Гц, которую можно рассматривать в качестве диагностического признака изношенного насоса.

Установили, что односторонний износ втулок радиальных сопряжений связан с синхронной прецессией вала, которая возникает при увеличенном исходном дисбалансе РК, локально одностороннем его расположении по длине вала и повышенном износе концевых деталей, который обусловлен несоосностью валов в шлицевых муфтах и возбуждает высокие уровни вибрации вплоть до их поломки. Максимальное значение виброскорости при этом в конце опыта 70 мм/с, что в 28 раз выше исходных значений.

Выявили принципиальное различие влияния износа радиальных и осевых сопряжений ступеней на динамику установки. При малых подачах на границе рабочей зоны наблюдали катастрофический износ осевых сопряжений, но небольшие величины износа радиальных сопряжений 0,28...0.46 мм после 180...300мин

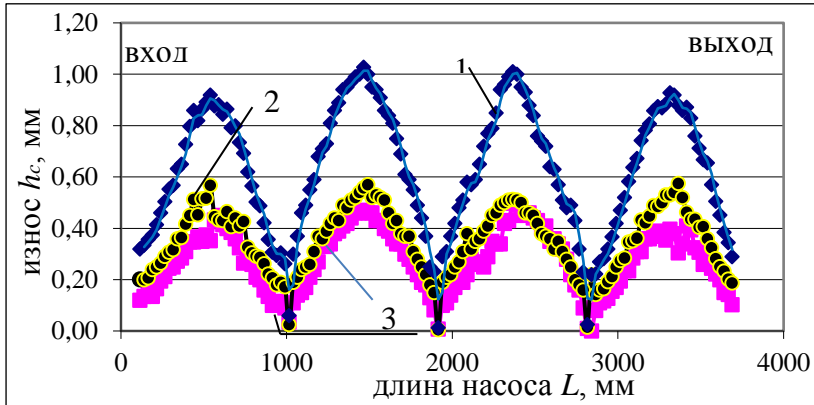


Рис.19 - Изменение износа радиальных сопряжений по длине насоса с износостойкими промежуточными подшипниками: 1-износ сопряжения, 2-износ втулки РК, 3-износ корпуса НА

и умеренные значения виброскорости 8,5...16 мм/с. Таким образом, износ осевых сопряжений оказывает существенно меньшее влияние на динамику установки, чем износ радиальных сопряжений. Вместе с тем, после разрушения текстолитовых шайб РК увеличивается момент сопротивления вследствие трения "металл-металл", что в двух случаях привело к разрушению вала. Катастрофический износ осевых сопряжений не приводит к эффекту усиления износа радиальных сопряжений, а износ радиальных сопряжений в значительной степени влияет на износ осевых сопряжений.

Применение *износостойких промежуточных подшипников* из твердого сплава ВК8 изменяет распределение износа радиальных сопряжений по длине насоса, рис.19. Износ радиальных сопряжений секции с подшипниками изменяется по синусоиде между износостойкими подшипниками. Испытания секций с большой подачей (до 500 м³/сут) не выявили су-

и умеренные значения виброскорости 8,5...16 мм/с. Таким образом, износ осевых сопряжений оказывает существенно меньшее влияние на динамику установки, чем износ радиальных сопряжений. Вместе с тем, после разрушения текстолитовых шайб РК увеличивается момент сопротивления вследствие трения "металл-

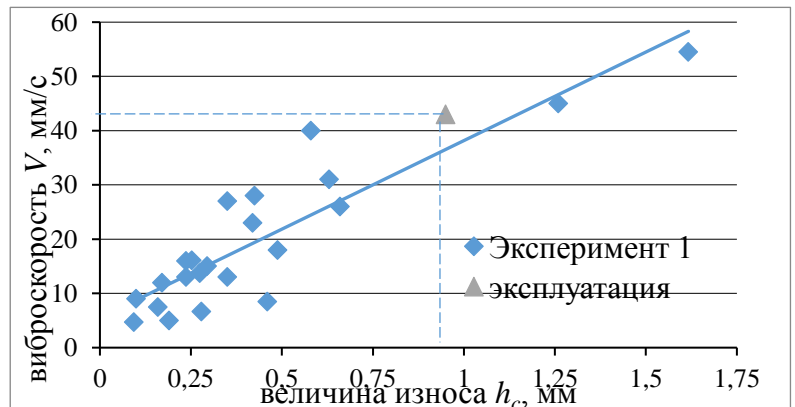


Рис. 20 - Зависимость виброскорости корпуса секции от износа радиальных сопряжений

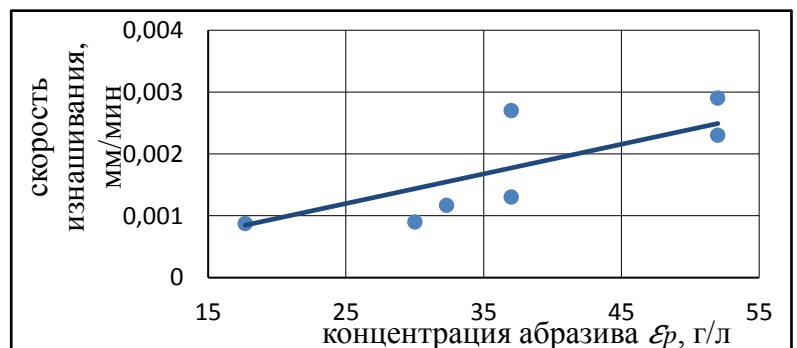


Рис. 21 - Зависимости скорости изнашивания радиальных сопряжений секции от концентрации абразива

щественных различий с результатами, полученными при испытаниях секций типоразмера 5-50.

Испытания на износ 26 насосных секций различных типоразмеров с подачей 25...500 м³/сут позволили впервые получить фундаментальную зависимость виброскорости V_r корпуса секции от величины износа радиальных сопряжений, рис.20, которую аппроксимировали линейной функцией $V_r = 32,65\bar{h}_c + 5,52$ [мм/с] с коэффициентом $R^2 = 0,7907$. Ее можно использовать для прогнозирования ресурса и наступления отказа по критерию прочности. Величина \bar{h}_c – средняя суммарная величина износа радиальных трибосопряжений, определяется по формуле $\bar{h}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (h_{PK} + h_{НА})$, где: h_{PK} – величина износа РК; $h_{НА}$ – величина износа НА; N – количество ступеней. Для расчета величины износа радиального сопряжения каждой ступени по длине НС необходимо знать форму упругой линии вала. Зависимость скорости изнашивания радиальных сопряжений секции от концентрации абразивных частиц, рис.21, в заданном диапазоне аппроксимируется линейной функцией $v_p^c = 5 \cdot 10^{-5} \varepsilon_p$, мм/мин с $R^2 = 0,9329$.

В седьмой главе представлена реализация результатов исследований, конструкторско-технологические решения по повышению работоспособности трибосопряжений, дано описание комплекса разработанных испытательных стендов для перспективных насосов с высокой частотой вращения вала (12000 об/мин и выше), рис.22, разработанных на основе методологических подходов настоящей работы. Приведен практический расчет вероятности разрушения обсадной колонны с использованием результатов работы.

На основании полученных результатов для повышения износостойкости рекомендуются следующие решения:

- 1 Для предотвращения разрушения подшипников при динамических нагрузках использовать технические решения с комбинированными втулками.
- 2 Для каждого типоразмера установки произвести расчет диапазона резонансных частот и включить их в паспортные характеристики оборудования для обеспечения работоспособности при нестационарных режимах, выводе на режим, повторно-кратковременных режимах.
- 3 Перспективным направлением дальнейших научных исследований по повышению износостойкости УЭЛН являются: исследование процесса эрозионного изнашивания при минимальных значениях углов взаимодействия струи жидкости и поверхности деталей ($\sim 2^0$) и в условиях вихреобразования потока.
- 4 Для насосов с высокой частотой вращения (до 12000 об/мин) необходимо исследовать условия возникновения эрозионно-кавитационных явлений и повышенного тепловыделения в трибосопряжениях с использованием разработанных стендов.

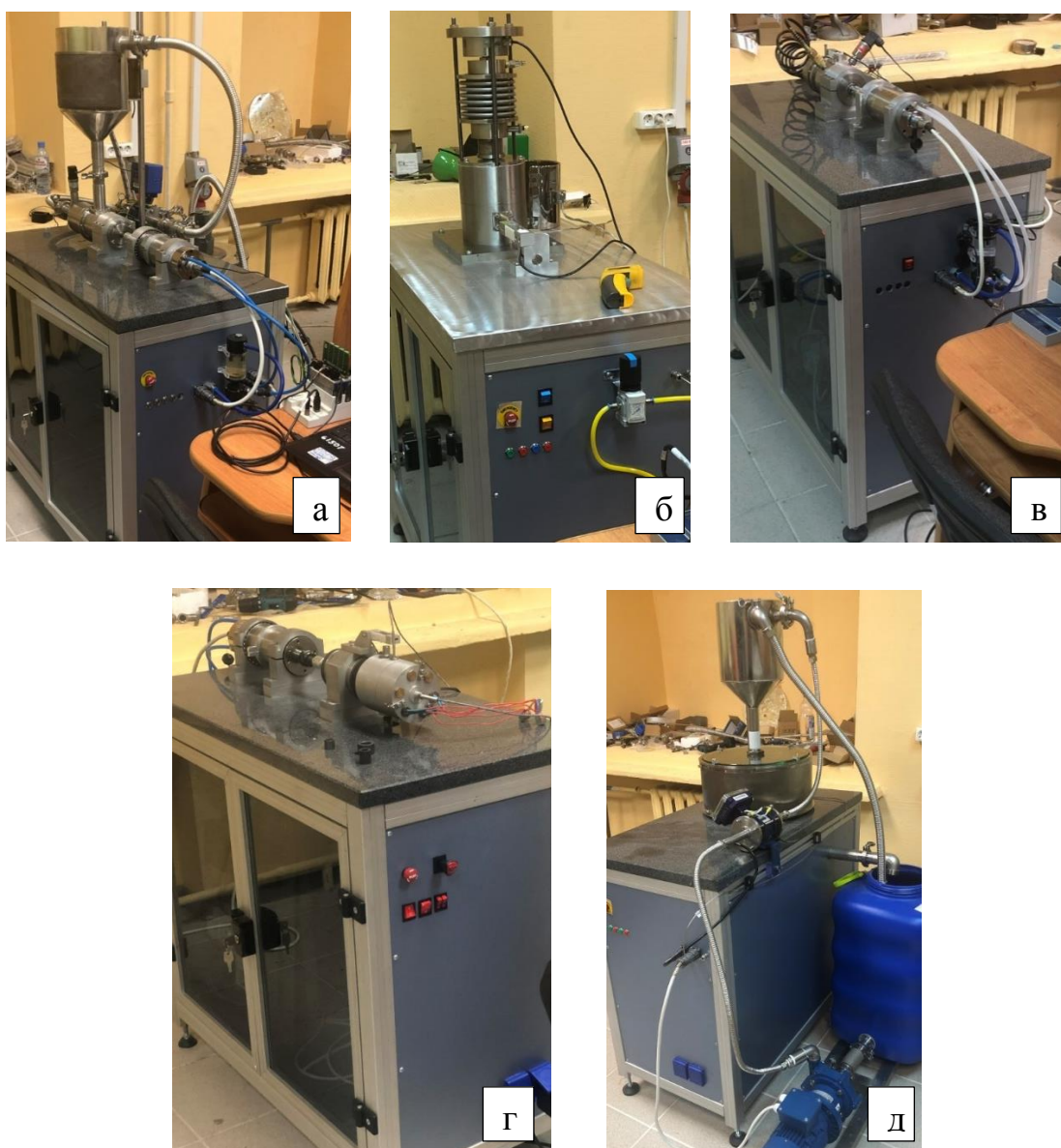


Рис. 22 - Комплекс разработанных стендов для испытаний деталей высокооборотных УЭЛН: а – ступеней; б – осевых гидродинамических подшипников; в - торцовых уплотнений; г – радиальных сопряжений; д – для эрозионного изнашивания материалов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена важная проблема обеспечения и прогнозирования износостойкости электроприводных лопастных насосов при нестационарных режимах эксплуатации на основе исследования процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания основных элементов и материалов с учетом динамики установки. Основные результаты работы использованы при устранении отказов УЭЛН - "полет" в нефтяных компаниях России, а также повышении ресурса. Работа удостоена Премии Правительства РФ в области науки и техники. Экономический эффект от внедрения результатов работы в ЦБПО ЭПУ ОАО "Сургутнефтегаз" составил 207.735.816 рублей, в ОАО "Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз" – свыше 120 млн.руб.

ВЫВОДЫ:

1. Впервые разработана трибодинамическая модель насосной секции УЭЛН, включающая закон изнашивания сопряжений в условиях прецессионного вращения вала, установлена связь синхронной и асинхронной прецессии с формой износа радиальных сопряжений. Разработана физическая модель секции на основе полученных критериев подобия динамических прогибов модели и натуре.

2. Впервые в мировой практике на основании результатов испытаний насосных секций установлена связь между изменением износа радиальных сопряжений вдоль оси секции и амплитудой виброскорости. Виброскорость изношенной НС более чем на порядок выше начальных значений. Предложен диагностический признак повышенного износа секции (износ свыше 0,5мм) в процессе эксплуатации, заключающийся в появлении $\frac{1}{2}$ гармоники в спектре частот колебаний.

3. Разработана трибологическая модель ступени нефтяной при прецессионном вращении вала установки на основе суперпозиции процессов абразивного и эрозионного (гидроабразивного) изнашивания, включающая кинетические, гидравлические факторы, свойства материалов, среды, и расчетная зависимость износа сопряжений от эксплуатационных факторов.

4. Впервые получена зависимость скорости коррозионно-эрозионного изнашивания порошковых сталей на основе железа, легированных Ni, Cr, Mo и чугуна Ni-resist в условиях раствора HCl с кварцевым песком в зависимости от содержания легирующих элементов. Наибольшая износостойкость у порошковой стали ПК10Х16Н9Д20 и чугуна Ni-resist, тип 4, которые рекомендованы для сложных условий работы.

5. Установлено, что при коррозионно-эрозионном изнашивании свойства абразива преимущественно влияют на формирование зоны локального износа деталей ступени ("промыв"), коррозионная активность жидкости – на интенсивность изнашивания материала, которая зависит от величины скорости удара частиц в степени 2,6...2,9 и от размера частиц в степени (0,33...0,5).

6. Предложен комплексный критерий оценки работоспособности осевого гидродинамического подшипника на основе коэффициента трения и трибодинамического фактора, заключающегося в резком увеличении коэффициента трения при изменении нагрузки.

7. Показано, что перспективы применения УЭЛН с высокой частотой вращения (до 12000об/мин) зависят от интенсивности коррозионно-эрозионных процессов и динамики, обусловленной износом сопряжений. При увеличении частоты вращения в два раза скорость эрозионного изнашивания НА увеличивается в 11 раз.

8. Создан комплекс научно-исследовательских стендов с компьютерной системой управления для исследования механизмов изнашивания в абразивосодержащей, коррозионно-активной среде и определения трибологических характеристик узлов и деталей УЭЛН, в том числе для перспективных насосов с частотой вращения до 12000об/мин.

9. Разработана концепция обеспечения и прогнозирования трибологического ресурса УЭЛН на основании физического моделирования процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания трибосопряжений и динамики установки.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Смирнов Н.И. Исследования и пути повышения ресурса УЭЦН / Н.И.Смирнов, Г.К.Мухамадеев, Н.Н.Смирнов // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2000, №3, с.13-16.
2. Неволин В.Н. Трибологические свойства и синергетический эффект двухслойного WSe_x (Ni)/а-С покрытия / В.Н.Неволин, Р.И.Романов, А.Л.Смирнов, Н.И.Смирнов, В.Ю.Фоминский // Перспективные материалы, 2003, №5, с.70-77.
3. Ковалев Е.П. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор) / Е.П.Ковалев, М.Б.Игнатьев, А.П.Семенов, Н.И.Смирнов, В.Н.Неволин, В.Ю.Фоминский // Трение и износ. - том 25, №3, с.316-335.
4. Смирнов Н.И. Повышение износостойкости твердого сплава модифицированием нанодобавками / Н.И.Смирнов, Н.И.Борисенко, Н.Н.Смирнов, М.В.Прожега // Трение и износ. - 2007, том 28, №5, с.465-470.
5. Смирнов Н.И. Исследование трибологических свойств детонационных наноструктурированных покрытий на основе WC-Co // Трение и износ. - 2007, том 28, №2, с.195-199.
6. Смирнов Н.И. Трибологические аспекты надежности центробежных насосов / Н.И.Смирнов, М.В.Прожега, Н.Н.Смирнов // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007, №3, с.32-37.
7. Афанасьев А.А. Повышение надежности деталей технологической оснастки с использованием твердых сплавов, модифицированных наночастицами карбида вольфрама / А.А.Афанасьев, Н.И.Борисенко, В.И.Калмыков, Лисин П.А., С.В.Рягузов, В.В.Сербин, Е.В.Сербина, Н.И.Смирнов, Н.Н.Смирнов, М.В.Прожега, О.Н.Борисенко // Ремонт, восстановление, модернизация. – М.: Наука и технологии, 2008. №1. С.36-44.
8. Смирнов Н.И. О причинах сломов валов УЭЦН / Н.И. Смирнов, С.Ф. Горланов, Н.Н.Смирнов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012, №3, с.17-22.
9. Кошманов В.Е. Импульсная имплантация ионов при лазерной абляции материалов / В.Е.Кошманов, А.Л.Смирнов, В.Ю.Фоминский, Н.И.Смирнов, В.Н.Неволин // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2003, №2(51), с.37-51.
10. Смирнов Н.И. Исследование износостойкости насосных ступеней / Н.И.Смирнов, Н.Н.Смирнов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009, №7, с.30-33.
11. Смирнов Н.И. Трибологическая динамика центробежных насосов / Н.И. Смирнов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015, №2, с.32-36.
12. Иванов А.С. Влияние пластических деформаций микронеровностей на сопротивление усталости винтов резьбовых соединений погружных центробежных насосов при их нагружении пульсирующей отрывающей силой / А.С.Иванов, Н.И.Смирнов, С.В.Муркин, М.М.Ермолаев // Вестник машиностроения, 2015. №5, с.14-17.

13. Иванов А.С. Сопротивление усталости винтов резьбовых соединений погружных центробежных насосов при их нагружении круговым опрокидывающим моментом / А.С.Иванов, Н.И.Смирнов, С.В.Муркин, М.М.Ермолаев // Вестник машиностроения, 2015, №7, с.17-21.
14. Иванов А.С. Повышение надежности резьбовых соединений погружных центробежных насосов / А.С.Иванов, Н.И.Смирнов, С.В.Муркин // Вестник машиностроения, 2015. №8, с.45-47
15. Смирнов Н.И. Исследование особенностей вибрационного состояния насосных секций / Смирнов Н.И., Григорян Е.Е., Смирнов Н.Н. // Бурение и нефть. 2016. № 1. С. 23-27.
16. Смирнов Н.И. Исследование влияния работоспособности фрикционной муфты на эксплуатационные характеристики стрелочного электропривода / Смирнов Н.И., Прожега М.В., Смирнов Н.Н. // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 4. С. 460-465.
17. Смирнов Н.И. Износ и вибрация насосных секций УЭЦН / Смирнов Н.И., Григорян Е.Е., Смирнов Н.Н. // Бурение и нефть. 2016. № 2. С. 52-56.
18. Смирнов Н.И. Исследование износостойкости твердого сплава, модифицированного нанодобавками / Смирнов Н.И., Прожега М.В., Смирнов Н.И. // Трение и износ. 2007. Т.28. №5. С.465-470.
19. Смирнов Н.И. Исследование эрозионной стойкости материалов УЭЦН / Смирнов Н.И. / Neftegaz.RU. 2017. № 7. С.48-55.
20. Смирнов Н.И. Исследование влияния износа подвижных сопряжений на отказ погружных электроприводных лопастных насосов для добычи нефти / Смирнов Н.И., Григорян Е.Е. // Проблемы машиностроения и надежности машин 2019, №1, с.102-107.
20. Белов Д.С. Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых покрытий
11. Ti–Al–Ni–N и Ti–Al–Ni–Mo–N к изнашиванию и эрозии / Белов Д.С., Сергеев В.С., Блинков И.В., Смирнов Н.И., Черногор А.В. // Трение и износ. 2021, том 42, №2. С.136-144.
21. Смирнов Н.И. Особенности износа высокооборотных погружных насосов для добычи нефти / Смирнов Н.И. / Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 62-65.
22. Smirnov, N.I. Yagovkina, A.N. Prozhega, M.V. Smirnov, N.N. Safonov, I.A. Methodology development of the materials erosion tests. Journal of Friction and Wear, 39(4), с. 335-340, 2018.
23. Смирнов Н.И. Разработка методики эрозионных испытаний / Н.И. Смирнов, А.Н. Яговкина, М.В. Прожега, Н.Н. Смирнов // Машиностроение и инженерное образование. 2017. №2(51). С.33-40.
24. Смирнов Н.И. Особенности изнашивания подшипников установок электроприводных лопастных насосов с парой трения «эластомер – металл» / Н.И. Смирнов, Н.Н. Смирнов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2022. № 11–12. С. 66–69.
25. Смирнов Н.И. УЭЛН как трибодинамическая система: методы исследования / Н.И.Смирнов // Neftegaz.RU №4(136). 2023, С. 46-51.

Патенты

1. Патент РФ №2371611, 2009. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Прожега М.В., Горланов С.Ф., Свидерский С.В. Многоступенчатый центробежный насос.
2. Патент РФ №2356026, 2009. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Прожега М.В., Свидерский С.В., Горланов С.Ф. Устройство для испытания на износ радиальных пар трения.
3. Патент РФ №2373439, 2009. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Горланов С.Ф., Свидерский С.В., Прожега М.В., Тупицын Ю.Ю. Способ изготовления сборной внутренней втулки подшипника скольжения.
4. Патент РФ №2371694, 2009. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Свидерский С.В., Горланов С.Ф. Стенд для исследования износа рабочей ступени центробежного насоса.
5. Патент РФ №2463147, 2012. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н. Способ восстановительного ремонта ступеней центробежного насоса.
6. Патент РФ №2444719, 2012. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н. Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ.
7. Патент РФ №2349875, 2009. Явелов И.С., Каплунов С.М., Даниелян Г.Л., Смирнов Н.И. Устройство для контроля неровностей и неоднородностей движущейся поверхности.

8. Патент на полезную модель №188355 Устройство для измерения момента трения упорных подшипников скольжения / Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Сахвадзе Г.Ж.
9. Патент на полезную модель №188359 Устройство для измерения сил трения подшипников скольжения Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Прожега М.В., Сахвадзе Г.Ж.
10. Патент RU 2763763 С1 Способ восприятия радиальной нагрузки при вращении и подшипник скольжения по этому способу Авторы: Пятов И.А., Кринский А.Ю., Смирнов Н.И., Ладанов С.В., Колесов С.Е. Оpubл. 10.01.2022 Бюл. №1.

Статьи в зарубежных изданиях Scopus, Web of Science

1. Voronin, S., Smorygo, O., Bertrand, P., Smurov, I., *Smirnov, N.*, Makarov, Y. Thermal-diffusion synthesis of thick molybdenum disulphide coatings on steel substrates // *Surface & Coatings Technology*, 2004. Vol. 180-181, pp. 113-117.
2. Fominski, V., Demin, M., Nevolin, V., Fominski, D., Romanov, R., Gritskevich, M., *Smirnov, N.* Reactive pulsed laser deposition of clustered-type MoS_x (x ~ 2, 3, and 4) films and their solid lubricant properties at low temperature. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 653. DOI: 10.3390/nano10040653.
3. *Smirnov, N.I.*, Prozhega, M.V., Smirnov, N.N., Zelenskay, M.N., Pyatov, I.S., Shaposhnikova, K.V., Ladanov, S.V. Study of the wear resistance of alloyed powder-based hybrid materials manufactured using "KARBUL" technology. (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 747 (1), статья № 012044, DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012044.
4. Goikhman, A., Fominski, D., Gritskevich, M., Romanov, R., Fominski, V., *Smirnov, N.* Features of pulsed laser ablation of MoS₂ and MoSe₂ targets and their influence on the tribological properties of the deposited low friction films. (2020) *Journal of Physics: Conference Series* 1686, статья № 012044. doi:10.1088/1742-6596/1686/1/012044.
5. *Smirnov, N. I.*, and Skvortsova, E. S., Prospects for the use of high-speed ESP for oil production. (2020) *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 996, статья № 012024, DOI:10.1088/1757-899X/996/1/012024.
6. Smirnov, N. I. and Grigoryan E. E. Study of the Impact of Wear of Movable Interfaces on Failures of an Immersible Electrically Operated Vane Pump for Oil Extraction. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2019, Vol. 48, No. 1, pp. 79–83.
7. *Smirnov, N.I.*, Smirnov, N.N., Prozhega, M.V., Matveev, S.A., Shirobokov, O.V., Gorbunov, A.V., Zheltyshev, O.V. Performance study of electric pump unit bearings of spacecraft thermal control systems. (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 747 (1), статья № 012043.
8. Belov D.S., Blinkov I.V., Sergevnin V.S., Volkhonskii A.O., Bondarev A.V., Lobova T.A., *Smirnov N.I.* Abrasive, hydroabrasive, and erosion wear behaviour of nanostructured (Ti, Al) N-Cu and (Ti, Al) N-Ni coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2018. T. 338. C. 1-13.
9. Sergevnin, V.S., Blinkov, I.V., Belov, D.S., Volkhonskii, A.O., Kuptsov, K.A., *Smirnov, N.I.* Wear and erosion of arc-PVD multilayer Ti-Al-Mo-N coatings under various conditions of friction and loading. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. T. 98. № 1-4. C. 593-601.

Иные издания

1. Н.И.Смирнов, Н.Н.Смирнов Расчетно-экспериментальный метод повышения ресурса УЭЦН // *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*. 2006, №1, с.30-34
2. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Горланов С.Ф. Научные подходы к повышению надежности УЭЦН // *Инженерная практика*. 2010, №2, с.14-18.
3. Смирнов Н.И. Новые подходы к повышению ресурса электропогружной установки // *Инженерная практика*. 2012, №2, с.5-9.
4. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н. Исследование коррозионно-механического разрушения деталей УЭЦН // *Инженерная практика*. 2011, №8, с.22-29.
5. Смирнов Н.И. Применение расчетно-экспериментальных методов повышения ресурса УЭЦН // *Инженерная практика*. 2011, №2, с.6-13.

6. Смирнов Н.И. Ресурсные испытания ЭЦН: Тест на износ (по материалам доклада «Современные методы испытаний ЭЦН на ресурс») // Нефтегазовая вертикаль. 2008, №12 (191), с.168 – 171.
7. Смирнов Н.И. Ресурсные испытания // Нефтегазовая вертикаль. №11 (240). 2010, с.22.
8. Смирнов Н.И. Разработка единой методики испытаний УЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. 2009, №21. С.52-56
9. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н., Лукин А.В. Компьютерные нанотехнологии в нефтяном машиностроении // Oil&Gas Eurasia/ 2006, №6. С.52-54
10. Смирнов Н.И. Разработка комплекса стендов и методик испытаний УЭЦН на ресурс/Нефтегазовая вертикаль 13-14. 2013
11. Смирнов Н.И. Смирнов Н.Н. Особенности проведения ресурсных испытаний УЭЦН/ Инженерная практика, 01, 2013, с.10-14.
12. Смирнов Н.И., Горланов С.Ф. Оптимизация межсекционных соединений УЭЦН // Oil&Gas Eurasia. 2007, №3. С30-33
13. Смирнов Н.И. О вибрации, износе и прочности для практиков // Нефтегазовая Вертикаль. №19. 2014. С.19-21
14. А.С.Иванов, Н.И.Смирнов, С.В.Муркин, М.М.Ермолаев Влияние пластических деформаций микронеровностей на ослабление затяжки резьбовых соединений погружных центробежных насосов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 8. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. С.27-31
15. Н.И.Смирнов, Н.Н.Смирнов Увеличение ресурса центробежных насосов для добычи нефти на основе использования детонационных покрытий // В кн. «Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин» – М.: ЛЕНАНД, 2013. – с.343 – 355.