ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертационной работе Смирнова Николая Ивановича на тему «Повышение износостойкости лопастных насосов в нестационарных режимах эксплуатации посредством триботинамического анализа», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3. «Трение и износ в машинах»

Актуальность работы

Надежное функционирование нефтедобывающей отрасли имеет большое значение для развития страны. Ее развитие происходит на фоне нескольких неблагоприятных факторов: ухудшения структуры запасов нефти, увеличения количества малодебитных скважин и доли трудно извлекаемых запасов. Эти факторы неблагоприятны для работы основного вида оборудования для механизированной добычи нефти – установок электроприводных лопастных насосов (УЭЛН), в которых основным агрегатом, подверженным негативному воздействию пластовой жидкости, является электролопастной насос (ЭЛН). В отличие от электродвигателя, работающего в маслозаполненном корпусе, трибологические узлы и детали ЭЛН работают в смеси воды, нефти, механических примесей, газовых включений и коррозионно-активных веществ, что ускоряет деградационные процессы, в первую очередь износ.

Электролопастной насос как объект исследования является уникальным агрегатом, отличающимся большим соотношением длины к диаметру, не имеющим аналогов среди насосной техники. Это обстоятельство принципиально затрудняет выбор методов и средств исследования износостойкости, т.к. износы могут иметь большие величины, а сам процесс изнашивания происходит с изменением динамики насоса вследствие увеличения зазоров в сопряжениях. Основным средством изучения являются испытания насосных сборок или использование универсальных машин трения для исследования трибологических свойств материалов. Но такие подходы не объясняли взаимосвязь вибрации и износа.

При изучении изнашивания трибологических пар одним из важных требований к модели является знание кинематики контакта, которая определяется особенностями вращения вала.

В этом плане работа Смирнова Н.И., построенная на изучении особенностей изнашивания насосной секции, трибосопряжений при учете формы вращения вала, обусловленного динамикой, в различных эксплуатационных условиях, направлена на решение назревшей необходимости в совместном изучении трибологических и динамических процессов насосной секции и является актуальной и востребованной учеными и инженерами.

Научная новизна исследований и полученных результатов

Автор впервые предложил рассматривать ЭЛН как трибодинамическую систему, состоящую из трибологической и динамической подсистем, и исходя из этого и примененной методологии исследования им получены новые научные результаты.

Автор научно обосновал и установил закономерности изменения износа трибосопряжений и амплитуды виброскорости по длине секции, заключающиеся в подобии их формы, в преимущественном влиянии износа радиальных сопряжений на изгибные колебания, а износа осевых сопряжений на крутильные колебания. Получен диагностический признак повышенного износа, заключающий в появлении ½ гармоники в спектре частот колебаний.

Впервые получены критерии аффинного подобия натуры и модели насосной секции УЭЛН как динамической системы, которые нашли применение в конструкции научно-исследовательских стендов и разработке трибодинамической модели секции.

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.

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.

Научная и практическая ценностьзаключается в следующем:

- разработана трибологическая модель ступени при синхронной прецессии вала и методики испытаний на коррозионно-эрозионное

изнашивание, позволяющая получать реальную форму износа радиальных сопряжений;

- разработаны научные основы расчета износа радиальных сопряжений на основе суперпозиции абразивного и эрозионного износа при прецессионном вращении вала;

- принципиальной особенностью работы является проведение большого количества экспериментов основных узлов и широкого круга материалов, для чего автором разработан комплекс испытательных стендов и методик, позволяющих получать триботехнические характеристики критических узлов и материалов в условиях приближенных к реальным;

- получены трибологические характеристики и экспериментальные зависимости ряда материалов, использующихся на практике и перспективных для применения в ступенях и подшипниках, включающие порошковые стали, чугуны Ni-resist, полимеры, керамические материалы и твердые сплавы, покрытия, испытанные в условиях с абразивом и с кислотой, которые могут использоваться в качестве систематизированного справочного материала;

- на основе теоретических и экспериментальных результатов разработаны конструкции подшипников и конструкционно-технологические решения повышения ресурса секций для использования в реальных конструкциях насосов;

- решена проблема отказов установок УЭЦН по критерию прочности («полет») в нефтяных компаниях РФ на основе методологии автора, за что он удостоен Премии Правительства РФ в области науки и техники,

- автором получены по результатам исследований в соавторстве 8 патентов РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезную модель.

Результаты исследований автора по этой теме внедрены на предприятиях нефтегазового комплекса: в АО «АЛНАС», АО «НОВОМЕТ», ООО «КЕРАМЕТ», ООО «БОРЕЦ», компании «Schlumberger». Экономический эффект от внедрения результатов работы в ЦБПО ЭПУ «Сургутнефтегаз» составил свыше 207 млн. руб, в ОАО «Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз» - свыше 120 млн. руб.

Общее содержание диссертационной работы

Диссертация представляется законченным научным трудом, хорошо структурирована, написана технически грамотным языком и включает семь глав, выводы и рекомендации, список литературы – 323 наименования, объемом 454 страницы и содержит 225 рисунков, 72 таблицы, 3 приложения. Содержание соответствует Паспорту научных специальностей Высшей

аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ по специальности 2.5.3. – Трение и износ в машинах.п.10 Физическое и математическое моделирование процесса трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель, приведены научная новизна и практическая значимость.

В **главе 1** автор провел тщательный анализ проблем обеспечения износостойкости и ресурса на основании статистического материала по отказам на нефтяных месторождениях Сибири и за рубежом. Структура главы понятна и включает несколько разделов: условия эксплуатации, критерии работоспособности, тенденции развития моделей и анализ основных механизмов разрушения, анализ экспериментальных методов исследования изнашивания и вибрации, основные пути повышения износостойкости, цель и задачи исследования.

В **главе 2**автор приводиттеоретические исследования процессов изнашивания и динамики на основе численного моделирования и использования методов теории подобия.

Рассматривается динамическая модель УЭЛН с простейшим законом изнашивания и случайным распределением дисбаланса с варьированием величины износа радиальных сопряжений, изменения дисбаланса, наличием подшипников. В результате решения задачи получены основные типы вращения вала, частоты колебаний, влияние подшипников на износ.

Получены критерии аффинного подобия динамики насосной секции и модели насосной секции для проведения дальнейших исследований.

Предложена модель изнашивания радиальных сопряжений на основе суперпозиции абразивного и эрозионного износа и получены расчетные зависимости скорости изнашивания насосной секции и радиальных сопряжений ступени при синхронной прецессии вала, а также расчетные зависимости скорости локального эрозионного изнашивания проточной части ступени.

Рассмотрены алгоритмы определения предельного состояния по критерию прочности корпуса и вала вследствие износа.

В **третьей главе** дается методология разработки комплекса испытательных стендов для исследования трибологических и динамических исследований. Можно отметить высокий уровень оборудования с современными измерительными системами.

Разработаны стенды для исследования трибодинамических процессов насосных секций в вертикальном и горизонтальном исполнении; стенды для испытаний ступеней и подшипников при прецессионном вращении вала для двух диапазонов производительности; стенд для испытаний осевых гидродинамических подшипников в масле; стенд для испытаний торцевых уплотнений; центробежный стенд для исследования эрозионного изнашивания материалов.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследованийтрибосопряжений ЭЛН. Рассматриваются в качестве объектов исследования ступени, подшипники радиальные, осевые гидродинамические подшипники, а также приводится технология оптимизации трибологических свойств перспективного материала PEEK.

Отличает большой перечень исследованных материалов и типов образцов, а также условий опытов. Проведенные комплексные исследования позволили получить коэффициенты для расчетных зависимостей, разработанных в главе 2.

Установлено, что влияние напорно-расходной характеристики (НРХ) в наибольшей степени проявляется при изнашивании осевых сопряжений, получены зависимости скорости изнашивания осевых сопряжений ступени от рабочей точки НРХ и величины осевой силы.Разработана методика и средства измерения осевой силы ступени в различных условиях.

Получены экспериментальные зависимости скорости изнашивания осевых и радиальных уплотнений ступени от концентрации абразива. При этом влияние типоразмера на скорость абразивного изнашивания несущественно.

Установлен важный вывод о влиянии частоты вращения на износостойкость радиальных сопряжений и подшипников. Получены зависимости скорости изнашивания подшипников от концентрации абразива.

При испытаниях более 70 типов осевых подшипников выделены наиболее перспективные технологии: бронза Cu83Sn7Zn3Pb7 и подшипники с самоустанавливающимися сегментами с покрытием PEEK.

Замечено, что при нагружении подшипника осевой силой в некоторых случаях возникают скачки коэффициента трения, которые свидетельствует о граничном режиме и могут служить критерием работоспособности подшипника в условиях нестационарных нагрузок.

Пятая глава посвящена исследованию процессов коррозионно-эрозионного изнашивания ступеней при нормальной и повышенной

температуре, а также исследованию процесса эрозионного изнашивания материалов.

Получена важная зависимость скорости коррозионно-эрозионного изнашивания порошковых сталей и чугунов Ni-resistот содержания легирующих элементов, что позволяет этот результат использовать при разработке новых материалов. Установлено сильное влияние температуры на скорость изнашивания: двукратное увеличение температуры приводит к изменению массы образцов в 8,5…14,5 раз, а наибольшей износостойкостью обладает порошковая сталь Х16Н9Д20-Пр и чугунNi-resist, тип 4.

При исследовании эрозионного изнашивания материалов выявлены основные механизмы разрушения: микрорезание и деформационный износ. Наибольшее влияние оказывают: скорость частиц и характер абразива, его форма.

В **шестой главе** приведены экспериментальные результаты износостойкости насосных секций и вибрации в среде с абразивом. Опыты проведены с 26 насосными секциями длиной 3…5 метров и производительностью 25…5000 $м^3$/сут.

Подтверждены результаты моделирования о подобии изменения износа и вибрации по длине секции, а также условия возникновения одностороннего износа втулок.

Установлено, что износ радиальных сопряжений значительно влияет на вибрацию, износ осевых сопряжений – в значительно меньшей степени, однако определяющим образомвлияет на крутильные колебания.

Безусловно большое значение для практики имеет полученная автором зависимость амплитуды виброскорости от износа радиальных сопряжений и зависимость скорости изнашивания от концентрации абразива.

В **седьмой главе** приведены реализация результатов работы, конструкторско-технологические решения по повышению износостойкости, описание разработанного комплекса испытательного оборудования для высокооборотных насосов, приведен пример расчета на эрозионное изнашивание.

Обоснованность научных положений и выводовзаключается в использовании концептуального подхода к рассмотрению объекта исследования как трибодинамической системы, применении общенаучных методов: анализа, синтеза, классификации, декомпозиции, моделирования, прогнозирования. Научные положения обосновываются анализом статистического материала, классифицированного по физически понятным

критериям. Исследование трибодинамического процесса проводится на основании декомпозиции механической системы, от общего к частному. Обоснованность научных положений подтверждается разработкой физических моделей процессов и подобием моделей и натуры. Результаты исследований сопровождаются иллюстративными материалами в виде рисунков, графиков, таблиц, расчетными зависимостями. Результаты сравниваются с данными из литературных источников, используемыми автором при написании работы.

Достоверность результатов достигаетсяпутем глубокой проработки исходного материала: статистического материала по отказам на 1000 скважин, достаточно большого количества литературных источников по исследуемой тематике – исследованию процессов абразивного, эрозионного, коррозионно-эрозионного изнашивания в трибологических узлах.

Результаты моделирования процессов подтверждаются результатами испытаний на специально разработанных стендах с современной системой измерения и подобием натуры и модели.

Основные научные выводы и рекомендации, практические результаты прошли апробацию на международных российских и международных конференциях, опубликованы в ведущих журналах из списка ВАК. С использованием результатов автора разработан с его участием Стандарт РФ 56830-2015 «Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов»

Замечания по работе

1 В качестве коррозионно-активной добавки автор использует при испытаниях раствор соляной кислоты. Однако известно, что основным коррозионным фактором на месторождениях является сероводород. Чем вызван такой выбор и как коррелируют результаты работы с натурой?

2 В главе 2 получены расчетные зависимости для определения интенсивности эрозионного изнашивания (2.38, 2.42), в которых приводятся теоретические значения показателя степени скорости, угла соударения, а в главе 5 приведены экспериментальные значения. Не приведен расчет интенсивности изнашивания по корректируемым значениям. А он был бы полезен.

3 В какой степени применение автором терминов «эрозионное изнашивание», «коррозионно-эрозионное изнашивание» обосновано? По ГОСТ для описания рассматриваемых процессов изнашивания более подходит термин «гидроабразивное изнашивание».

4 По тексту диссертации замечены отдельные недостатки в оформлении: встречаются отдельные неточные ссылки, описки, нарушения размерности физических величин в системе СИ.

Однако отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления от работы.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Основное содержание диссертационной работы отраженов 53 публикациях автора, из которых 26 входят в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ, 11 публикаций в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и WebofScience. Диссертант принимал участие докладчиком в более 20 научных конференциях.

Рекомендации по применению результатов и выводов диссертационной работы

Результаты работы будут интересны предприятиям, их научным центрам, разрабатывающим и изготавливающим соответствующее оборудование, ремонтным базам нефтяных компаний, ВУЗам, выпускающим специалистов нефтегазового профиля.

Заключение

На основании экспертизы рассмотренной работы можно заключить, что диссертационная работа Смирнова Н.И. «Повышение износостойкости лопастных насосов в нестационарных режимах эксплуатации посредством трибодинамического анализа» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне на актуальную тему, и содержит новые научные результаты. Проведенные автором исследования, посвященные изучению закономерностей и механизмов изнашивания узлов трения насосных секций,обеспечению износостойкости погружных лопастных насосов, можно квалифицировать как успешное решение важной научной проблемы повышения износостойкости, внедрение результатов которой вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертационная работа Смирнова Н.И. отвечает требованиям ВАК РФ (п. 9-11, 13, 13 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям.

Соискатель Смирнов Николай Иванович, несомненно, заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент,
Профессор кафедры «Технология

производства и эксплуатации двигателей
летательных аппаратов»,
доктор технических наук, доцент
(05.02.04)

Петр Николаевич Хопин

«9» октября 2023 г.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,
Тел. +7 901 276-36-81
e-mail: chopinp@mail.ru
Согласен на обработку своих персональных данных

Подпись Хопина П.Н. заверяю.

Директор института №12 МАИ:

Павел Андреевич Иосифов

МП