

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, Сидорова Михаила Игоревича на диссертацию Смирнова Николая Ивановича на тему «Повышение износостойкости лопастных насосов в нестационарных режимах эксплуатации посредством трибодинамического анализа», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах

Актуальность работы

Эффективность разработки нефтяных месторождений во многом зависит от производительности и надежности нефтедобывающего оборудования, в том числе электроприводных лопастных насосов (ЭЛН), с использованием которых добывается свыше 70% нефти в России. Основными особенностями ЭЛН как механической системы являются сочетание узлов, работающих в потоке пластовой жидкости, содержащей механические примеси, и узлов в маслозаполненных камерах, что обуславливает протекание различных процессов трения и изнашивания: абразивного, эрозионного изнашивания, гидродинамики. Износ подшипников и материалов пар трения в процессе эксплуатации в среде с абразивными частицами и при использовании технологий с периодическими режимами, приводят к изменению динамического состояния оборудования, по причине возникающей вибрации, к авариям и поломкам, выходу из строя электрической системы. Динамическое состояние ЭЛН в настоящее время оценивается только на предприятиях-изготовителях, при приемо-сдаточных испытаниях и не оценивается в процессе эксплуатации. Это обстоятельство не позволяет прогнозировать наступление отказа.

Другим не менее важным обстоятельством безаварийной работы ЭЛН является отсутствие моделей изнашивания трибологических узлов и секции в целом, а при изменении динамики, затрудняет разработку конструктива насоса, подбор износостойких подшипников и определение требований к их качеству.

На основании этого тема рассматриваемой диссертационной работы Смирнова Н.И., посвященной повышению износостойкости лопастных насосов в нестационарных условиях эксплуатации посредством трибодинамического анализа, является востребованной и актуальной.

Новизна исследований и полученных результатов

Автором на основании рассмотрения ЭЛН как трибодинамической системы установлены закономерности изменения износа трибосопряжений и амплитуды виброскорости по длине секции. Они заключаются в подобии их формы, в преимущественном влиянии износа радиальных сопряжений на изгибные колебания, а износа осевых сопряжений на крутильные колебания. Диссертантом получен диагностический признак повышенного износа, заключающийся в появлении $\frac{1}{2}$ гармоника в спектре частот колебаний.

В диссертационном исследовании получены критерии аффинного подобия натуры и модели насосной секции УЭЛН как динамической системы, и применить их 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.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации рецензируемой работы базируются на концептуальном подходе к рассматриваемому объекту исследований как трибодинамической системе с использованием общенаучных методов: анализа статистических данных, обобщения, декомпозиции механической системы, моделирования процессов динамики и изнашивания, прогнозирования ресурса.

Достоверность и обоснованность результатов работы не вызывает сомнений, т.к. научные результаты подтверждаются большим количеством модельных и натурных экспериментов, а достоверность экспериментальных результатов подтверждается использованием физически понятных моделей, использованием условий опытов, в максимальной степени похожих на натурные. Кроме того, использование современных измерительных систем позволяет обеспечить высокую точность получаемых результатов.

Научная и практическая значимость работы

При проведении исследований автор использовал современные научно-технические методы повышения износостойкости лопастных насосов при нестационарных условиях эксплуатации, включающие подобие модельных и натуральных условий при испытаниях, что позволило получить обобщенные трибологические характеристики, определяющие научную значимость работы и имеющие практическую ценность, и заключающиеся в:

- получении на основании большого количества натуральных испытаний насосных секций зависимости амплитуды виброскорости от степени износа радиальных сопряжений ступеней, не имеющей аналогов, которую можно использовать для предотвращения отказов;

- выделении диагностического признака изношенного насоса, заключающегося в появлении определенной гармоник в спектре частот, позволяющего дистанционно получать информацию о процессе изнашивания в скважине;

- разработке научных основ расчета радиальных сопряжений на основе суперпозиции абразивного и эрозионного износа при прецессионном вращении вала;

- разработке трибологической модели ступени при синхронной прецессии вала и методики коррозионно-эрозионного изнашивания проточной части ступени;

- разработке новых технических решений, подшипников, работающих в условиях нестационарных нагрузок, подтвержденных патентами;

- разработке комплекса современных стендов оригинальной конструкции и методик испытаний, позволяющих с высокой точностью получать триботехнические характеристики узлов и материалов, а также трибологические и динамические характеристики насосных секций;

- разработке комплекса инновационных стендов для испытаний узлов и материалов высокооборотных стендов с частотой до 12000 об/мин;

- получении трибологических характеристик материалов ступеней, подшипников, в том числе перспективных высоколегированных порошковых сталей, нирезистов, керамических материалов, полимеров и покрытий, испытанных в условиях абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания.

- решении проблемы отказов установок ЭЦН по классификации нефтяников «полет» в нефтяных компаниях РФ, за что автор был удостоен Премии Правительства РФ в области науки и техники.

Общая оценка содержания работы

Диссертация выглядит законченным научным трудом, логично структурирована и включает семь глав, выводы и рекомендации, список литературы – 323 наименования, объемом 454 страницы машинописного текста и содержит 225 рисунков, 72 таблицы, 3 приложения. Содержание соответствует п.10 Физическое и математическое моделирование процесса трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем Паспорта научных специальностей Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ по специальности 2.5.3. – Трение и износ в машинах.

Автореферат представлен на 33 страницах и дает полное представление о содержании диссертации и вынесенных на защиту научных положениях.

Введение. Обоснована актуальность работы, кратко изложены проблемы и пути их решения, сформулирована цель, приведена научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу проблем обеспечения износостойкости и ресурса УЭЛН и тенденций развития, приведен статистический материал по отказам оборудования. Материал главы хорошо структурирован: объект исследования, условия эксплуатации, критерии работоспособности и тенденции развития моделей, анализ основных механизмов разрушения деталей ЭЛН при нестационарных режимах, анализ тенденций в развитии методов исследования процессов изнашивания и динамики, анализ экспериментальных методов, обзор основных путей повышения износостойкости, цель и задачи исследования. Автор использовал большой объем иностранной литературы при анализе современных тенденций развития науки по теме исследования.

В **Главе два** приводятся теоретические результаты исследования трибодинамической системы на основе моделирования динамики насоса с увеличивающимся зазором в сопряжениях и случайно распределенным дисбалансом рабочих колес с целью определения типа вращения вала и частот колебаний.

Автором используются методы теории подобия для нахождения подобия предложенной модели и природы насосной секции, критерии аффинного подобия динамики для разработки экспериментальных стендов и получения расчетных зависимостей.

Рассмотрена модель изнашивания радиальных сопряжений на основе суперпозиции абразивного и эрозионного износа, получены расчетные зависимости определения скорости изнашивания насосных секций, ступеней, радиальных сопряжений при синхронной прецессии вала, а также расчетные зависимости для локального эрозионного изнашивания внутренней поверхности направляющих аппаратов.

Третья глава посвящена методологии разработки комплекса испытательных стендов, дано общее описание конструкции, выделены отличительные признаки, одним из которых является современная измерительная система на базе программно-аппаратного продукта National Instruments.

Автором разработаны стенды для исследования трибологических процессов в сопряжениях и проточной части ступеней с прецессионным типом вращения вала в двух исполнениях на разную производительность: 15 – 150 м³/сут и 25 – 500 м³/сут; стенд для испытания осевых гидродинамических подшипников для определения коэффициента трения; стенд для испытаний торцевых уплотнений; вертикальный и горизонтальный стенды для исследования трибодинамических процессов насосных секций, а также стенд для исследования процессов эрозионного и коррозионно-эрозионного изнашивания материалов.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса изнашивания трибосопряжений ЭЛН в условиях абразивных сред. В процессе испытаний автор исследовал влияние напорно-расходной характеристики ступени на изменение износостойкости трибосопряжений, рассматривал условия изменения осевой силы ступени в зависимости от конструкции, вязкости среды.

В подтверждение полученных расчетных зависимостей подробно исследована кинетика изменения износа радиальных сопряжений, показаны условия смены механизма изнашивания – с абразивного на эрозионный.

Рассмотрено влияние главного фактора – абразива, а также коррозии на изнашивание сопряжений, получены расчетные зависимости скорости изнашивания от концентрации абразива.

Получены зависимости износа от типоразмера ступени и частоты вращения. Показано, что частота вращения является наиболее существенным фактором, влияющим на эрозионный износ направляющих аппаратов, и слабо влияет на износ сопряжений.

Рассмотрены вопросы износостойкости подшипников из различных материалов: кинетика изнашивания, влияние абразива и коррозионно-

активной среды, влияние материалов, в том числе керамических материалов и твердых сплавов.

Приведены результаты испытаний более 70 осевых гидродинамических подшипников на трение из различных материалов в масле и температуре 170 – 220⁰ С, в результате которых выделен трибодинамический фактор, влияющий на ресурс и заключающийся в резком повышении коэффициента трения при переходе с одного уровня нагрузки на другой.

В пятой главе приведены результаты исследования скорости коррозионно-эрозионного изнашивания ступеней в водном растворе кислоты с абразивом, при изменении температуры.

Получена важная зависимость скорости коррозионно-эрозионного изнашивания порошковых сталей и чугунов Ni-resist от содержания легирующих элементов (Ni, Cr, Mo). Наибольшей коррозионно-эрозионной стойкостью обладают порошковая сталь ПК10Х16Н9Д20 и чугун Ni-resist, тип 2, имеющие также наибольшую коррозионную стойкость.

Показано, что увеличение частоты вращения РК приводит к интенсификации эрозионного процесса НА, который описывается экспоненциальной зависимостью.

При исследовании морфологии изношенной поверхности образцов материалов ступеней выявлено, что в механизме изнашивания присутствует деформационная составляющая (деформационный износ) и микрорезание (износ микрорезанием), а наиболее значимыми факторами являются скорость потока жидкости, тип абразива, угол соударения.

В шестой главе приведены результаты испытаний насосных секций по изнашиванию и динамике.

В результате автор получил фундаментальную зависимость амплитуды виброскорости от износа радиальных сопряжений и зависимость скорости изнашивания от концентрации абразива. Сравнение результатов испытаний ступеней и секций показало удовлетворительную сходимость.

Были подтверждены результаты моделирования изменения износа по длине секции и односторонний износ втулок при синхронной прецессии.

В седьмой главе автор привел реализацию результатов исследования, конструкторско-технологические решения, описание стендов для испытаний высокооборотных насосов и пример расчета эрозионного износа.

Замечания по диссертации

При общей положительной оценке результатов диссертации Смирнова Н.И. следует отметить ряд замечаний.

1 Автор рассматривает только синхронную прецессию вала в расчетных зависимостях по определению абразивного износа. Однако при моделировании динамики во второй главе указано, что имеются условия возникновения асинхронной прецессии вала и связанного с ней износа. По-видимому, целесообразно уточнить метод расчета для этого случая.

2. В пятой главе в зависимости скорости коррозионно-эрозионного изнашивания у параметров не соответствуют размерности.

3. При оформлении графического материала автор использует различные стили оформления с использованием рамок, что усложняет восприятие материала.

4. Автор утверждает, что исследование динамики изнашивающейся в процессе эксплуатации роторной системы аналитическим способом или численными методами трудно реализуемо или просто невозможно. Однако, применение методов проактивной диагностики несомненно добавило бы объем знаний особенно при эксплуатации.

Указанные замечания не снижают теоретическую значимость и практическую ценность работы, не касаются основных положений, вынесенных соискателем на защиту, носят рекомендательный характер в части дальнейшего расширения проводимых исследований.

Публикации отражают основное содержание диссертации. По теме диссертационной работы опубликовано 53 научные работы, 26 из них входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 11 работ опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science. Автором получено 8 патентов РФ на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты работы рекомендуется использовать организациям – изготовителям погружного оборудования, научно-исследовательским институтам, ВУЗам машиностроительного профиля, а также в нефтяных компаниях для применения в учебном процессе сотрудников инженерных подразделений.

Заключение

Диссертационная работа Смирнова Н.И. на тему «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 диссертационные исследования, посвященные изучению закономерностей и механизмов изнашивания узлов трения насосных секций 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 п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а автор диссертационной работы Смирнов Николай Иванович, заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент
Доктор технических наук
(2.5.3 Трение и износ в машинах)
Заместитель начальника отдела

М.И.Сидоров

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Инжиниринговый центр мобильных решений
119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78
Телефон: +7(499) 215-65-65, E-mail: info@mirea.ru

Подпись руки Сидорова М.И.

удостоверяю Специалист по кадрам
Управления кадров

Чернышева В.Г.
17.08.2023г

