

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной
деятельности Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Тверской
государственный технический университет"



А.А. Артемьев

—
октября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Тверской государственный технический университет" на диссертационную работу Смирнова Николая Ивановича "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. Установки электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) являются основным видом оборудования для механизированной добычи нефти, в том числе трудноизвлекаемых запасов в России. Эффективность их использования в значительной степени определяется износостойкостью, особенно в связи с тем, что в последние годы в технологии добычи нефти с помощью УЭЛН применяются периодические режимы, режимы с регулированием частоты вращения. Кроме того, происходит изменение состава и качества пластовой жидкости за период

эксплуатации установки: изменяется количество механических примесей, газа, воды, коррозионно-активных веществ и т.д., что ужесточает условия работы оборудования и ускоряет изнашивание.

Возникновение нестационарных режимов работы, повышенной динамики насоса, влияющих на возникновение дополнительных напряжений в элементах конструкции и вероятность их разрушения, в значительной степени обусловлено процессами изнашивания пар трения и не нашло должного отражения в исследованиях.

Изучение процессов изнашивания и динамики производится, как правило, независимо друг от друга, что не позволяет корректно объяснить причины отказов УЭЛН ("полет" и др.) и получить трибологические характеристики. Практикуется в основном конструкторско-технологический подход, заключающийся в изменении конструкции элементов установки и подборе материалов и технологий для устранения слабых мест, который требует длительных натурных испытаний и значительных материальных затрат. Поэтому весьма актуальным является исследование основных трибологических процессов динамической системы, направленное на обеспечение износостойкости УЭЛН при нестационарных режимах эксплуатации, на основе изучения особенностей трения и износа насосных секций (НС).

В диссертационной работе обозначенная проблема решается на основе рассмотрения УЭЛН как трибодинамической системы с последующим исследованием траектории вала при изнашивании ступеней и подшипников, определением критериев динамического подобия натуры и модели на основе теории подобия, разработкой расчетных зависимостей абразивного и эрозионного изнашивания трибосопряжений и проточной части, разработкой комплекса оригинальных испытательных стендов и проведением большого количества испытаний ступеней, подшипников, насосных секций, материалов.

В связи с вышеизложенным, актуальность диссертационной работы соискателя, посвященной решению указанной проблемы, сомнений не

вызывает, а полученные результаты имеют перспективу для использования на предприятиях, в научно-исследовательских организациях, разрабатывающих и выпускающих нефтепогружное оборудование.

Структура и содержание диссертационной работы и автореферата, в том числе положений, выносимых на защиту, отражают рассматриваемую автором тему. Работа имеет логичную и последовательную структуру, главы и параграфы соответствуют заявленной цели и задачам исследования.

Содержание диссертации соответствует требованиям Паспорта научных специальностей Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах, п.10 Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем.

Диссертация изложена на 454 страницах, состоит из введения, 7 глав (1 глава "Анализ проблем обеспечения износостойкости и ресурса УЭЛН и тенденций развития", 2 глава "Моделирование процессов изнашивания и динамики ЭЛН, 3 глава "Разработка комплекса экспериментального оборудования для исследования процесса изнашивания и динамики УЭЛН, 4 глава "Исследование процесса изнашивания трибосопряжений УЭЛН, 5 глава "Исследование процесса коррозионно-эрозионного изнашивания, 6 глава "Исследование трибологических и динамических процессов насосных секций", 7 глава "Реализация результатов исследований"), заключения, списка литературы, содержащего 323 источника и приложений. В диссертации имеется 225 рисунков и 72 таблицы.

Автореферат, представленный на 33 страницах, в полном объеме отражает содержание диссертации. Основные результаты отражены в 53 научных работах, в том числе 26 работах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук и 11

работах в международных базах цитирования. Автором получены 8 патентов на изобретения, 2 патента на полезную модель.

Во **Введении** представлены сведения об актуальности и существующих подходах к изучению проблемы.

С учетом работ, проведенных другими исследователями, Смирнов Н.И. ставит цель исследования - решение проблемы повышения износостойкости НС при нестационарных режимах эксплуатации на основе исследования процессов абразивного и коррозионно-эрозионного изнашивания радиальных и осевых сопряжений ступеней нефтяных (СН), подшипников и материалов с учетом динамики насосной секции. В соответствии с поставленной целью автором сформулированы необходимые для ее достижения задачи. Выносимые на защиту положения кратки и понятны.

В **Главе 1** автором выделены современные тенденции в решении проблемы повышения износостойкости трибосопряжений для предотвращения отказов функционирования и параметрических отказов УЭЛН, отмечены ведущие ученые и научные школы, которые внесли весомый вклад в научные основы обеспечения износостойкости сложных механических систем.

В **Главе 2** приведены теоретические исследования процессов абразивного изнашивания сопряжений при прецессии вала, эрозионного изнашивания поверхностей деталей и динамики системы, предложена методология расчета предельного состояния ресурсопределяющих деталей.

Основой теоретических исследований автора 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. Износ сопряжений представляется в виде суперпозиции абразивного и эрозионного износа и рассчитывается для случая прецессионного типа вращения вала.

В **Главе 3** приведена концепция разработки комплекса испытательных стендов, на основе единых подходов конструирования, с использованием в качестве базовой системы измерения и обработки результатов программно-аппаратного продукта фирмы National Instruments. Описаны конструктивные особенности и характеристики стендов для исследования насосных секций, ступеней, упорных подшипников, уплотнений, стенда для исследования эрозионного изнашивания материалов.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований трибосопряжений ступеней, подшипников промежуточных и осевых гидродинамических, а также оценка различных технологий. Исследования кинетики изнашивания трибосопряжений ступени подтвердили положение об абразивном и эрозионном изнашивании. Автором получены зависимости скорости изнашивания трибосопряжений из легированных чугунов и порошковых материалов, подшипников из керамических материалов в абразивосодержащей среде от различных факторов. Получена зависимость величины осевой силы ступени от вязкости жидкости, конструктивных особенностей.

Трибологические исследования более 70 осевых гидродинамических подшипников различной конструкции в масле позволили автору 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 различной конструкции и 10 типов материалов, а также HVOF и детонационных покрытий при различных типах абразива, коррозионно-активной среды (HCl) и температуры, условий возникновения локального разрушения ("промыв").

Получена зависимость скорости коррозионно-эрозионного изнашивания ступеней от содержания легирующих элементов в материалах и концентрации абразива.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований трибологических и динамических процессов 26 насосных секций в абразивосодержащей среде, которые подтвердили выводы численного моделирования, связь одностороннего износа с синхронной прецессией, увеличение динамики с износом радиальных трибосопряжений, различный вклад в динамику износа радиальных и осевых трибосопряжений. Получены зависимости вибрации от износа и концентрации абразива.

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). Приведен практический расчет вероятности разрушения обсадной колонны с использованием результатов работы.

Обоснованность научных положений и выводов основана на использовании концептуальных подходов к исследованию сложных трибосистем, какой является УЭЛН, а также общенаучных методов: анализа, синтеза, обобщения, классификации, моделирования, прогнозирования и т.д. На основании анализа отказавшего оборудования систематизированы виды изнашивания и формы износа трибосопряжений. Декомпозиция трибодинамической системы позволила автору выделить два основного процесса: изнашивание и динамику, которые рассматриваются в диссертации совместно. Найдены критерии подобия природы и модели на основе теории подобия. Изложение результатов исследования сопровождается иллюстративным материалом в виде рисунков, таблиц, графиков, расчетных зависимостей. В тексте имеются ссылки на источники информации, использованные автором при написании диссертации.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждена глубокой проработкой большого объема научно-аналитической и статистической информации по исследуемой проблеме и широкого спектра

работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных процессам абразивного, коррозионно-эрозионного изнашивания, анализу трибологических и динамических характеристик лопастных насосов в процессе эксплуатации и при отказе на нефтяных месторождениях с использованием разработанных моделей, четким физическим смыслом полученных результатов. Результаты, полученные при моделировании трибодинамического процесса, при испытаниях трибосопряжений на модельных стендах подтверждены натурными испытаниями насосных секций.

Для получения достоверных результатов при экспериментальных исследованиях автором создан комплекс оригинальных испытательных стендов с современной измерительной системой и системой обеспечения условий опытов, в максимальной степени соответствующих натурным условиям.

Основные научные положения и практические результаты, полученные автором по результатам исследования, прошли апробацию в виде докладов на российских и международных научных конференциях, семинарах и рабочих совещаниях производителей оборудования и опубликованы в рецензируемых журналах, относящихся к списку ВАК.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена практическим внедрением разработок в нефтяных компаниях и заводах-изготовителях, а также при разработке Стандарта РФ 56830-2015 "Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов".

Научная новизна состоит в новом подходе автора к выбору методологии теоретических исследований, которая заключается в сочетании численных методов моделирования динамического процесса роторной системы при изменении зазоров в сопряжениях и теории подобия при создании физической модели НС, что позволило проводить исследование процессов изнашивания сопряжений ступеней и подшипников с учетом

формоизменения поверхности трения вследствие динамических нагрузок. Предыдущие подходы по данным литературных источников заключались в проведении испытаний коротких насосных сборок, которые не обеспечивали реальную динамику и подобие природы и модели и, как следствие, точность определения триботехнических характеристик. В качестве новых научных результатов автором диссертационной работы:

— установлены 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. Для их получения автором проведены длительные и сложные эксперименты 26 натуральных образцов НС, не имеющие аналогов в мировой практике;

— получен диагностический признак повышенного износа, заключающийся в появлении $\frac{1}{2}$ гармоника в спектре частот колебаний;

— получены критерии аффинного подобия природы и модели насосной секции УЭЛН как динамической системы, которые нашли применение при разработке трибодинамической модели НС и в конструкции научно-исследовательских стендов. Эти критерии позволили автору проводить трибологические исследования на ступенях, где динамика НС обеспечивалась валом переменной жесткости, что обеспечивало подобие природы и модели трибодинамической системы;

— установлена связь между формой износа радиальных сопряжений и видом вращения вала на основе результатов численного моделирования динамики УЭЛН с износом, подтвержденная результатами испытаний НС, проведенных автором на натуральных образцах.

— разработана трибологическая модель ступени насоса при прецессионном вращении вала на основе суперпозиции процессов абразивного и эрозионного изнашивания, включающая кинетические, гидравлические факторы, свойства материалов, среды, получена расчетная зависимость износа сопряжений.

Научная и практическая значимость работы заключается в разработке и развитии эффективных научно-технических методов повышения износостойкости лопастных насосов при нестационарных условиях эксплуатации, которые, в частности, позволили:

— разработать на основе теории подобия физическую модель НС и критерии подобия природы и модели, которые позволяют проводить экспериментальные исследования на ступени, обеспечивая воспроизведение реального процесса изнашивания;

— разработать научные основы расчета трибосопряжений ступеней и радиальных подшипников на абразивный и эрозионный износ при прецессионном вращении вала;

— получить зависимость виброскорости секции от величины износа радиальных сопряжений, которую можно использовать в измерительных системах для оценки предельного состояния насоса в процессе эксплуатации и для предотвращения отказов;

— получить зависимость скорости изнашивания НС от концентрации абразива в жидкости, которую можно использовать для оценки ресурса насоса в различных эксплуатационных условиях;

— выделить диагностический признак критического износа, заключающийся в появлении определенной гармоника в спектре частот изнашивающегося насоса, и позволяющий более надежно получать дистанционно информацию о износе насоса в скважине в отличие от регистрации изменения амплитуды;

— разработать новые перспективные решения по повышению износостойкости лопастных насосов, износостойкие подшипники, работающие в условиях нестационарных нагрузок, подтвержденные патентами;

— разработать модель и методику коррозионно-эрозионного изнашивания ступеней, включающую определение зоны локального износа и скорость коррозионно-эрозионного изнашивания, что позволяет прогнозировать наступление отказа ("промыв");

— получить новые характеристики износостойкости широкого класса материалов ступеней, в частности перспективных порошковых сталей, чугунов Ni-Resist и подшипников из керамических материалов в условиях, близких к эксплуатационным, которые рекомендуется использовать при проектировании и модернизации трибологических узлов насоса;

— разработать комплекс оригинальных испытательных стендов и методик, подтвержденных патентами, позволяющих корректно получать триботехнические характеристики критических узлов и материалов лопастных насосов, в том числе перспективных высокооборотных (до 12000 об/мин).

Основные результаты, полученные в данной работе, получены соискателем лично, в том числе им разработаны и изготовлены большинство испытательных стендов.

Выводы и основные положения диссертации могут быть использованы при разработке методов предиктивной аналитики для прогнозирования ресурса УЭЛН и технологии "цифрового двойника" при проектировании нового оборудования, а также в учебном процессе на кафедрах нефтепогружного и машиностроительного оборудования.

Замечания и рекомендации по диссертации. Несмотря на проведенные глубокие исследования и вклад автора в развитие теории и практики трения и износа в машинах, считаем необходимым обратить внимание на следующие недостатки:

1. Автор использует в некоторых случаях два термина для обозначения упорного подшипника: "упорный подшипник" и "осевой

гидродинамический подшипник". Необходимо конкретизировать применение одного и другого термина.

2. Автором используются термины "эрозионное" и "коррозионно-эрозионное" изнашивание при рассмотрении процесса изнашивания в водной среде с абразивом или в водной среде с абразивом и кислотой. В ГОСТ 27674-88 приняты термины "гидроабразивное изнашивание" и "коррозионно-механическое изнашивание". Необходимо обосновать это различие.
3. Глава 6 посвящена испытаниям натуральных объектов. Приведены результаты длительных испытаний на износ и вибрацию по каждой насосной секции. На наш взгляд материал несколько перегружен детальным описанием опытов, что значительно увеличило объем диссертации.
4. В Главе 7 дается пример расчета обсадной колонны на эрозионный износ по разработанной методике. Структурно более правильным было бы привести пример расчета на износ сопряжений ступени, т.к. от их износа зависит динамика насоса, что является главным аспектом рассматриваемой работы.
5. Автором предложены (Глава 2) интересные формулы для расчета абразивного и эрозионного износа сопряжений. Однако анализ этих формул не проведен достаточно полно и четко не оговорена область их применения. Так же в работе не выполнена экспериментальная проверка формул и поэтому их научная значимость не очень высокая.
6. В некоторых уравнениях, приведенных в диссертации для описания процесса изнашивания и в первую очередь в эмпирических уравнениях не выполняется правило размерностей. Не всегда размерность физических величин выражается в единицах СИ.

Высказанные замечания носят исключительно рекомендательный характер, не снижают общей положительной оценки уровня научной и

практической ценности проделанной работы, которая является полноценным научно-исследовательским трудом.

Заключение о соответствии диссертации требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Диссертационная работа Смирнова Николая Ивановича на тему "Повышение износостойкости лопастных насосов в нестационарных режимах эксплуатации посредством трибодинамического анализа" является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, на высоком научном уровне, в которой решена важная народнохозяйственная 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.

Тема диссертации актуальна, а полученные соискателем новые научные результаты обладают научной новизной и практической значимостью, вносят существенный вклад в развитие науки и практики в области трения и износа в машинах. Основные результаты исследований внедрены в ведущих нефтяных компаниях и на заводах – изготовителях УЭЛН и использовались ими для увеличения износостойкости погружного оборудования и предотвращения отказов ("полет").

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, теоретически и экспериментально обоснованы, прошли апробацию в научных изданиях, на научных конференциях и семинарах.

Содержание работы, ее научная новизна, обоснованность и достоверность полученных результатов, объем выполненных исследований, а также научная и практическая значимость позволяет утверждать, что диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от

24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Смирнов Николай Иванович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 – "Трение и износ в машинах".

Отзыв ведущей организации на диссертацию Смирнова Николая Ивановича подготовлен доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Прикладная физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Тверской государственный технический университет" Болотовым Александром Николаевичем.

Отзыв был обсужден и одобрен на заседании научно-технического семинара «Физика и механика контактного взаимодействия» кафедры прикладной физики, протокол №1 от 27 сентября 2023 г.

д. т. н., профессор,

зав. кафедрой «Прикладная физика»

ФГБОУ ВО «Тверской государственный

технический университет», доктор техн. наук

по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах



Болотов Александр Николаевич

Тел.: +7910-937-93-19;

E-mail: ac.tstu.tver@mail.ru

Сведения о ведущей организации.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тверской государственный технический университет". 170026, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22 Тел.+7 (4822) 52-63-35 Сайт: <https://tstu.tver.ru/> , E-mail: common@tstu.tver.ru

«5» октября 2023 г.