

## ОТЗЫВ

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

### 1. Актуальность темы диссертации

Повышение объемов добычи в нефтегазовой отрасли во многом зависит от надежности и износостойкости оборудования, в качестве которого в большинстве своем используются установки погружных электроприводных центробежных насосов (ЭЦН). Одной из конструктивных особенностей таких насосов является большое отношение длины к диаметру роторной машины (от 100 до 500) и наличие многочисленных узлов трибосопряжений, что существенно усложняет ее как общую трибологическую систему, подверженную в том числе динамическим воздействиям и возникновением дополнительных напряжений в элементах конструкции, под действием высоких значений удельных нагрузок, скоростей, температур, воздействием коррозионной среды и т.п.

Для узлов трения, работающих в таких сложных условиях, в первую очередь встают вопросы исследования динамики износа трущихся поверхностей, т.е. исследования основных трибологических процессов фрикционных пар, от правильного решения которых зависит обеспечение заданной долговечности трибосопряжений. Эти обстоятельства вынуждают проводить трудоемкие глубокие исследования по изучению механизмов трения и изнашивания, совершенствованию конструкций трибоузлов, подбору материалов трущихся пар и выявлению причин, вызывающих их недолговечную работу.

В этом смысле рассматриваемая работа Смирнова Н.И., посвященная изучению особенностей трения и износа основной ячейки погружных ЭЦН – насосной секции в различных условиях эксплуатации, в том числе при наличии прецессионного вращения вала ротора, в определенной степени восполняет существующий пробел в исследованиях изнашивания подвижных сопряжений и имеет большое научное и практическое значение.

Следует отметить, что данная работа уже давно назрела и то обстоятельство, что такое цельное и комплексное исследование создано не в профильной организации, а в академическом институте еще раз указывает на назревшую необходимость и высокий научный уровень решения проблемы.

Совершенствование узлов трения, выбор новых материалов и смазочных систем, включающих новые компоненты, требует углубленных научных исследований по изучению составов, строения, свойств, механизма взаимодействия их с поверхностями изнашивания. В этом отношении рассматриваемая работа диссертанта вносит существенный научный вклад в



решение проблемы повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения.

Таким образом, диссертационная работа Смирнова Н.И., направленная на изучение нестационарных режимов эксплуатации лопастных насосов и повышение их износостойкости и эксплуатационных свойств, является востребованной и актуальной.

## **2. Новизна исследований и полученных результатов**

Автором установлены и научно обоснованы закономерности изменения износа трибосопряжений и амплитуды виброскорости по длине секции, заключающиеся в подобии их формы, а также в преимущественном влиянии износа радиальных подшипников и осевых опор на изгибные и крутильные колебания соответственно и получении диагностического признака повышенного износа, заключающегося в появлении полугармоники в спектре частот колебаний.

Впервые получены критерии афинного подобия натуры и модели насосной секции установки электроприводного лопастного насоса как динамической системы, которые нашли применение в конструкции разработанных научно-исследовательских стендов и разработке трибодинамической модели секции.

Диссертантом на основании результатов численного моделирования динамики с износом и испытаний насосных секций установлена связь между формой изменения износа радиальных сопряжений и видом прецессии вала и получена зависимость виброскорости секции от величины износа радиальных трибосопряжений.

Разработана трибологическая модель ступени при прецессионном вращении вала на основе суперпозиции процессов абразивного и коррозионно-механического изнашивания, включающая кинетические, гидравлические факторы, свойства материалов и среды, и расчетная зависимость износа сопряжений.

## **3. Значимость результатов для практики**

Значимость результатов для практики заключается:

- в разработке комплекса испытательных стендов и методик, позволяющих надежно получать триботехнические характеристики критических узлов и материалов установки электроприводных лопастных насосов в условиях приближенных к реальным. При участии автора разработан стандарт РФ 56830-2025 «Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов»;
- в разработке модели и методики коррозионно-эрозионного изнашивания насосной секции, включающей определение зоны локального износа и скорости коррозионно-эрозионного изнашивания;
- в получении характеристик износостойкости широкого класса материалов для ступеней насосной секции - порошковых сталей, чугунов «нирезист» и подшипников в условиях, близких к эксплуатационным, которые могут быть использованы при проектировании и модернизации трибологических узлов;



- в разработке комплекса испытательных стендов для исследования трибологических характеристик ступеней насосных секций, упорных и радиальных подшипников, материалов, торцовых уплотнений для перспективных высокооборотных (до 12000 об/мин) установок электроприводных лопастных насосов;
- в решении задачи устранения отказов установок ЭЦН типа «полет» в нефтяных компаниях РФ. За решение этой проблемы автор был удостоен Премии Правительства РФ в области науки и техники.

По результатам исследований автором в соавторстве получены 8 патентов РФ на изобретение и 2 патента РФ на полезную модель.

Результаты работы автора внедрены и 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.

Экономический эффект от внедрения результатов работы в БПО ЭПУ ОАО «Сургутнефтегаз» составил свыше 207 млн. руб., в ОАО «Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз» - свыше 120 млн. руб.

#### **4. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения, выводы и рекомендации, приведенные в рассматриваемой работе, полностью обоснованы проведенным комплексом необходимых исследований: от идеи и создания теоретических предпосылок и аналитических выкладок, основанных на известных положениях фундаментальных наук, и сходимостью полученных теоретических результатов с большим объемом экспериментальных данных, до проведения лабораторных и стендовых экспериментов и испытаний узлов трения в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы не вызывает сомнений, так как базируется на большом количестве статистического материала по отказам реального насосного оборудования и подтверждено проведенными стендовыми и натурными испытаниями в условиях их эксплуатации. Кроме того, достоверность подтверждается использованием стандартизованных и принятых в научной практике методов статистической обработки экспериментальных данных, планирования экспериментов, применением апробированных методик расчета интенсивности изнашивания поверхностей узлов трибосопряжений.

#### **5. Общая оценка содержания диссертации**

Диссертация оставляет общее хорошее впечатление от прочтения. Материал диссертации структурирован и логично представлен, включает семь глав, общие выводы и рекомендации, список использованных источников



литературы (323 наименований), общим объемом в 454 страницы машинописного текста, содержит 225 рисунков, 72 таблицы и 3 приложения.

*Во введении* указывается общая характеристика представленной работы, сформулированы актуальность, цель, научная новизна и значимость проведенной работы для науки и практики.

*Первая глава* посвящена анализу состояния проблемы, решение которой предлагается автором в настоящей диссертации. Им проанализированы существующие научно-методические подходы к исследованию процессов трения и изнашивания лопастных насосов в пластовой жидкости, содержащей механические частицы и коррозионно-активные элементы при наличии динамических возмущений, обусловленных эксплуатацией и износом. Проведена большая кропотливая работа, по выделению современных тенденций в решении проблемы повышения износостойкости трибосопряжений для предотвращения отказов функционирования и параметрических отказов, перечисляются узкие места, которые сдерживают решение проблемы повышения износостойкости этого вида оборудования. На основании результатов анализа публикаций по рассматриваемой проблеме ставятся и формулируются задачи исследования.

*Во второй главе* приведены теоретические исследования процессов абразивного изнашивания сопряжений при наличии прецессии вала и динамики системы, дана методология расчета предельного состояния деталей, определяющих ресурс машины.

Теоретические исследования направлены на изучение и описание закономерностей изменения формы поверхности трения при прецессионном вращении вала, условия трения и взаимовлияния износа и динамики, определяющих вид вращения вала и форму износа поверхностей трибосопряжений, а также условия наступления предельного состояния основных узлов трения.

Автором рассмотрена модель изнашивания втулок радиальных сопряжений с учетом динамики вращения вала и его прецессии, для чего были получены критерии условия афинного подобия натуры и модели.

*Третья глава* работы посвящена разработке комплекса испытательных стендов на основе единых подходов конструирования и использования базовой системы измерения и обработки результатов программно-аппаратного продукта National Instruments для проведения отдельных испытаний насосной секции (НС), ступени нефтяной (СН), радиальных подшипников секции (ПС), гидродинамического подпятника гидрозащиты (ГЗ), торцового уплотнения (ТУ), материалов деталей. Методика предполагает проведение ускоренных испытаний ресурсопределяющих деталей, узлов и материалов в абразивосодержащей и коррозионно-активной среде, максимально соответствующей свойствам реальной пластовой жидкости.

Автором разработаны: стенды для исследования трибодинамических процессов насосных секций (в среде вода с абразивом) горизонтального и вертикального типов; стенды для исследования процессов трения и изнашивания ступеней и подшипников (в среде вода с абразивом и коррозионным компонентом) производительностью 15 - 150 м<sup>3</sup>/сут и 25 - 500



м<sup>3</sup>/сут; стенд для исследования пар трения торцовых уплотнений (среда масло); стенд для исследования трения упорного подшипника (в среде масло и при повышенной температуре); стенд для исследования эрозионной стойкости материалов (в среде вода с абразивом и коррозионным компонентом).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований трибосопряжений ступеней, подшипников, как промежуточных, так и опорных и осевых гидродинамических подпятников, а также технологии повышения износостойкости.

Проанализирована кинетика изнашивания радиальных сопряжений с выявлением двух участков износа и смены механизма изнашивания, когда минимальный зазор в сопряжении превышает максимальный размер абразивных частиц. Выявлено сильное влияние концентрации абразива на скорость изнашивания и дисбаланс рабочего колеса.

Установлено, что средние значения скоростей изнашивания радиальных сопряжений, выполненных из различных материалов, при испытаниях в воде с абразивом соотносятся: серый чугун/нирезист/порошковые стали как 1/0,64/0,34.

При испытании радиальных подшипников из твердых сплавов и керамики – WC-Co, SiC, ZrO<sub>2</sub>, SiC-релит в абразивосодержащей среде (концентрацией кварцевого песка 1,2...10 г/л) выявлена тенденция увеличения скорости изнашивания с увеличением частоты вращения – при увеличении частоты в 1,9 раза, скорость изнашивания увеличивается на 30%, при этом износостойкость подшипников из WC-Co в 18,1 и 14,6 раза выше, чем подшипников из SiC и ZrO<sub>2</sub> соответственно по причине низкой трещиностойкости последних.

Испытания осевых гидродинамических опор различных конструкций, как отечественных, так и зарубежных, выполненных из SiC, баббита, бронзы, с покрытиями РЕЕК и других материалов в маслах МДПНс и фирмы REDA в температурном диапазоне 170...220 °С показали, что наибольшей несущей способностью обладают подшипники сборной конструкции с сегментами из бронзы Cu<sub>82</sub>Sn<sub>7</sub>Zn<sub>3</sub>Pb<sub>7</sub>. При максимальной удельной нагрузке 24,4 МПа коэффициент трения составил 0,0023 при температуре 170 °С и 0,0019 – при температуре 220 °С. Перспективным материалом для данного узла трения являются также напеченное покрытие РЕЕК в осевом подшипнике с самоустанавливающимися сегментами, но имеет более высокие значения коэффициента трения (0,003 при 170 °С и 0,0043 – при 220 °С).

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

Пятая глава посвящена результатам исследования изнашивания ступеней насосных секций и материалов при различных типах абразива, коррозионно-активной среды и температуры, а также условий возникновения локального разрушения типа «промыв», которые показали, что тип и размер абразивных частиц принципиально влияют на область появления локальных разрушений направляющих аппаратов (НА). Так, крупные частицы пропанта производят интенсивный износ гильзы НА в зоне изменения направления потока – на



входных кромках лопаток НА и РК и в замковой части. Более мелкие частицы корунда разрушают преимущественно поверхности дисков НА и РК и зоны перехода диска в гильзу. Наибольшее влияние условия испытаний (вода с абразивом (10 г/л) и коррозионным компонентом – 3,5% HCl) при температуре 80 °С оказывают на изнашивание проточной части ступени.

Выявлено сильное влияние температуры модельной жидкости на изнашивание: так увеличение температуры жидкости с концентрацией HCl (4,6%) в два раза, с 40 до 80 °С, приводит к изменению массы деталей из чугуна «нирезист» в 8,5...14,5 раз. В этих условиях наибольшей износостойкостью обладают высоколегированная порошковая сталь X16N9D20-Пр и чугун «нирезист» тип 4.

Исследованиями морфологии поверхностей износа порошковых сталей и чугунов были выделены два основных механизма поверхностного разрушения – деформационный износ и микрорезание. При этом наибольшее влияние на процесс изнашивания оказывают скорость частиц и характер абразива: влияние размера частиц описывается степенной функцией, корунд и проппант изнашивают порошковые стали в 4,4...4,6 и в 6...4,3 раз интенсивнее, чем кварцевый песок той же размерности.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований трибологических и динамических процессов насосной секции в абразивосодержащей среде. Результаты получены при испытании 26 насосных секций с длинами от 3 до 5 метров в диапазоне подач 25...500 м<sup>3</sup>/сут.

Установлено, что односторонний износ втулок радиальных сопряжений связан с синхронной прецессией вала, возникающей вследствие дисбаланса РК, несоосностью валов в шлицевых муфтах и возбуждает высокие уровни вибрации вплоть до поломки. Максимальные значения виброскорости повышаются до 28 раз относительно исходной.

Автором показано, что износ радиальных сопряжений оказывает существенное влияние на динамику установки и в значительной степени влияет на износ осевых опор.

Следует отметить полученную автором фундаментальную зависимость виброскорости корпуса секции от суммарной величины износа радиальных сопряжений, которую можно использовать для прогнозирования ресурса и наступления отказа по критерию прочности.

Седьмая глава представляет реализацию результатов исследований, а также конструкторско-технологические решения по повышению работоспособности трибосопряжений и разработанный комплекс испытательных стендов для перспективных высокооборотных насосов с частотой вращения вала до 12000 об/мин и выше. Приведены рекомендации по повышению износостойкости и проведению дальнейших исследований.

## 6. Замечания, выявленные недостатки работы

В качестве замечаний к работе следует указать следующее:

1. Автором в тексте диссертации используются термины эрозионный износ, эрозионное изнашивание, которые, если следовать строго предписаниям ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание, смазка. Термины и определения, описывают



изнашивание в результате воздействия потока газа или жидкости (соответственно, газо- или гидроэрозионное изнашивание), но без участия абразивных частиц. Автором же во всех испытаниях использовались потоки модельных жидкостей с абразивными частицами, как, впрочем, это происходит и в реальной эксплуатации, и в таком случае изнашивание следует считать гидроабразивным. Очевидно, это связано с укоренившейся неверной традицией в названии этого вида изнашивания.

2. Аналогично, стенд для исследования процесса эрозионного изнашивания (стр.180) также следовало бы назвать как стенд для исследования процесса газо- или гидроабразивного изнашивания, поскольку в испытательной среде (жидкости или газе) при испытаниях именно абразивные частицы являются основным изнашивающим элементом.

3. На стр. 303-306 диссертации автор исследует влияние размера абразива на интенсивность изнашивания и приходит к выводу, что нет однозначного согласия по этом вопросу. Однако, в соответствии экспериментальными исследованиями, проведенными в нашем университете (см., например, Сорокин Г.М., Малышев В.Н. Основы механического изнашивания сталей и сплавов: учебное пособие. М.: Логос, 2014. -308 с. ISBN 978-5-98704-661-6, стр. 31-35), влияние размера абразивной частицы, практически, независимо от схемы взаимодействия абразива с поверхностью изнашивания (в воздушно-абразивном потоке, при трении скольжения по закрепленному абразиву, при ударе по незакрепленному абразиву, либо при движении в абразивной массе) в целом однотипно: при увеличении размера частицы безразмерный показатель износа  $K$  стремится к единице, т.е. при достижении абразивной частицей конкретного размера интенсивность изнашивания не меняется. Таким образом, нами установлено, что увеличение размера абразивной частицы выше 1200 мкм методически нецелесообразно, в то же время и использовать абразивные частицы размером менее 200...300 мкм также не следует, поскольку в этом случае качественно нового эффекта получить не удастся.

4. На стр.314-316 автор приводит исследования коррозионной стойкости испытываемых материалов, снимая анодные поляризационные кривые и измеряя потенциал свободной коррозии. По нашему мнению, для определения скорости коррозии более информативными были бы в этом плане потенциодинамические анодные и катодные кривые по Тафелю.

5. Стр. 189 дана неправильная ссылка на рис. 3.3 а,б

6. Стр.183,190 Рис. 3.20 и Рис.3.24 Описание к рисункам не соответствует позициям, указанным на нем.

7. На стр. 221 уравнение регрессии имеет коэффициент  $R = 0,9276$  (а не 9276)

8. На стр. 356 перепутано название таблицы 4.2 (вместо 6.2).

9. В списке цитируемой литературы встречаются наименования одного и того же источника под разными номерами, например: 139. Трение и износ. - 2007. – Т. 28, № 5. - С. 465-470 и тот же самый источник под номером 147. Трение и износ. - 2007. – Т. 28, № 5. - С. 465-470.

10. Имеется также некоторое количество шероховатостей в оформлении: ряд стилистических неточностей, опечаток, неточных ссылок и т.п. В частности:

- стр.29 указана вместо фтористоводородной кислоты (HF) HF;



- стр.45 Рис.1.9 дана неправильная ссылка по тексту на рис. 1.9 в, вместо 1.9 б;
- на стр. 58, 62 – отсутствуют ссылки на цитируемую литературу;
- стр.144, в уравнении (2.42) – ошибка в обозначении массы частицы, вместо  $m_a$  написано  $m_p$

Однако, отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления от выполненной работы.

### **7. Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

Основное содержание диссертации опубликовано в научной печати. По теме диссертации автором опубликовано 53 научных работ, 26 из которых входят в перечень ВАК Минобразования и науки РФ, 11 работ в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, в которых полностью отражена суть рассматриваемого исследования в целом, получены 8 патентов РФ на изобретения и 2 патента на полезную модель. Диссертант принимал участие и докладывал основные моменты своей работы на более чем 20 научных форумах различного уровня.

**8. Автореферат** написан четко, с приведением основных положений диссертации и достаточно полно отражает суть ее содержания.

### **9. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности**

Диссертационная работа Смирнова Н.И. соответствует паспорту специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах по пунктам: п.10 -Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем;  
п. 15 – Трибологические испытания: методы и устройства

### **10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результатами работы могут воспользоваться как научно-исследовательские организации, занимающиеся вопросами повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения (ЦНИИТМАШ, ИПМех РАН, вузы машиностроительного и нефтегазового профилей), так и организации, занятые эксплуатацией и ремонтом УЭЛН.

Кроме того, отдельные результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе при подготовке магистров по направлениям «Технологические машины и оборудование», «Материаловедение и технология материалов» и специальностям «Технология машиностроения» и «Материаловедение и технология новых материалов».

### **11. Заключение**

На основании экспертизы рассмотренной работы можно сделать вывод, 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 механизмов и закономерностей изнашивания улов трения погружных электроцентробежных насосов, можно квалифицировать как успешное решение важной научной проблемы повышения износостойкости, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертационная работа Смирнова Н.И. полностью отвечает требованиям ВАК РФ (п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям.

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

**Официальный оппонент,**

Профессор кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», доктор технических наук, профессор

Владимир Николаевич Малышев

«05» октября 2023 г.

*Подпись Малышева В.Н. заверяю.*

*Начальник ОК РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина*

*Ю.Е. Ширяев*

*Малышев Владимир Николаевич, доктор технических наук, диссертация защищена по специальностям 05.02.04 – Трение и износ в машинах и 05.02.01 – Материаловедение в машиностроении, профессор, профессор кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», РФ, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65, корп.1  
Тел.: +7 499 507 8788  
e-mail: vmal@inbox.ru*

*Согласен на обработку своих персональных данных*