

## АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Колисниченко Сергея Николаевича «Разработка конструктивно-технологических решений по снижению динамических нагрузок и повышению долговечности насосов колонкового бурения», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 8D07101 (6D071200) – «Машиностроение»

**Актуальность диссертационных исследований.** Казахстан, обладающий огромным запасом углеводородов, вносит весомый вклад в развитие мировой нефтегазовой отрасли. В инвестиционном проекте Казахстана задействованы крупные международные компании нефтегазового сектора. Особую привлекательность для мировых лидеров экспортёров нефти имеет освоение новых стратегически важных месторождений с применением комплексных установок колонкового бурения. Высокая их эффективность, производительность и ресурсная долговечность, должна обеспечиваться интеллектуальными и технологическими достижениями индустриально-технического развития отрасли Казахстана.

Потребность Национальных компаний в высокопроизводительных надежных насосных комплексах достаточно высока, а доля износа постоянно увеличивается, а также наблюдается прогрессирующее возрастание динамики цен на энергоресурсы, ремонт, восстановление, соответствующее их обслуживание. Технические аварии, отказы, остановы буровых установок в ряде месторождений Тенгиз, Узень и др., показывают дефицит знаний и технологий ремонта и восстановления, отсутствие систем и механизмов адаптации прочностных параметров насосов, а также контроля качества насосных агрегатов. Для решения этой задачи необходима модернизация конструктивных элементов буровых насосов, что сохранит положительный рост качества и безотказности буровых комплексов.

Проблема зависимости от иностранной продукции можно решить только импортозамещением за счет новых конструктивно-технологических решений, направленных ресурсную долговечность насосов буровых комплексов.

Жесткие условия эксплуатации буровых установок, циклически изменяющиеся динамические нагрузки при бурении, ужесточают требования к их надежности и безопасности эксплуатации.

Освоение новых прогрессивных технологий бурения скважин требует развития теории повышения ресурсной долговечности, ресурсосбережения конструкций узлов и агрегатов буровой установки. С целью повышения эффективности и надежности конструктивных элементов буровой установки, возросла потребность в модернизации энергетических установок, насосных агрегатов, приводов и рабочего органа.

При бурении, ремонте и освоении скважин важное место занимают буровые насосы, которые должны сохранять функциональность в тяжелых условиях и агрессивной среды поэтому **актуальность исследования**

**обусловлена** необходимостью снижения нагрузок, повышения ресурса и обеспечения их долговечности.

Аналитические исследования и патентный поиск существующих конструкций насосов, и систем управления зазором зацепления в зубьях сопряжения шестерен, показали, что существующие конструкции не обеспечивают перераспределение нагрузки и моментов в зависимости от режимов эксплуатации и сопротивлений. Циклическое воздействие динамических сил меняет структуру элементов насоса и приводит к отказам. Для повышения эффективности и качества эксплуатации бурового насоса, предложена конструкция бурового насоса с механизмом регулирования зазора шестерен, включающая автономную гидравлическую систему привода, с эксцентриковым механизмом, распределение нагрузки по поверхности шейки вала, что позволит регулировать зазор и глубину зацепления шестерен, обеспечивая высокие эксплуатационные свойства насоса и оптимально распределяя напряжения трансмиссионного и эксцентрикового валов с учетом износа проектной геометрии зубьев. Расширить ряд ремонтных размеров эксцентрикового вала привода и исключить прямое термическое воздействие на основу вала насоса возможно разработанным технологичным способом восстановления изношенных шеек эксцентрикового вала насоса методом установки термоупрочненных колец замкового типа.

**Цель диссертационной работы** является повышение эффективности и обеспечения ресурсной долговечности буровых насосов, путем внедрения конструктивно-технологической системы управления зазором зацепления шестерен и технологии ремонта эксцентрикового вала.

Цель диссертационного исследования заключается в решении следующих **задач**:

- исследовать перспективы и способы обеспечения долговечности насосов колонкового бурения;
- обосновать оптимальные динамические параметры поршневых насосов с учетом непостоянных нагрузочных режимов;
- разработать методику определения долговечности нагруженных структурных элементов поршневого насоса;
- усовершенствовать математическую модель процесса изнашивания шестерни вала при неравномерном распределении моментов сил и смещении площади контакта относительно оси симметрии зуба бурового насоса;
- обосновать качественные критерии сварных термоупрочненных колец эксцентрикового вала бурового насоса;
- установить зависимости изменения оптимальных значений площади наплавки, глубины провара и сварочного тока от скоростного режима сварки.
- разработать технологичный способ восстановлению эксцентрикового вала насоса, обеспечивающий ресурсную долговечность.
- разработать конструктивную систему управления величиной зазора зацепления в зубьях сопряжения шестерен трансмиссионного привода бурового насоса.

**Объект исследования** - буровые насосы для колонкового бурения.

**Предмет исследования**- зависимости процесса распределения динамических нагрузок по структурным элементам бурового насоса и влияние конструктивных параметров на его долговечность.

**Методы исследования.** В процессе диссертационных исследований использовались апробированные методы математического анализа, математической статистики, теоретической механики, гидравлики, имитационного моделирования, алгоритмизации, отработка технических решений и испытаний в производственных условиях, физических экспериментов оценки.

**Научная новизна** заключается в следующих положениях и результатах:

- усовершенствована математическая модель динамических процессов в сопряжениях бурового насоса, учитывающая гидродинамику процесса бурения, геометрический критерий  $\Delta P_V$  и коэффициент снижения прочности  $K_n$ , определяющие взаимосвязь между сопротивлениями на рабочем органе и износом деталей насоса;

- обоснованы критерии эффективной работы и оптимальные динамические параметры бурового насоса на основе исследований причинно-следственной связи ресурса и непостоянных нагрузочных режимов эксплуатации;

- разработана методика и алгоритм определения долговечности нагруженных структурных элементов поршневого насоса, учитывающая неравномерное распределение моментов сил по трансмиссионному валу шестерни при эксплуатационном износе;

- усовершенствована математическая модель процесса изнашивания шестерни вала при смещении площади контакта относительно оси симметрии зуба бурового насоса.

- установлены зависимости коэффициента учитывающего чувствительность асимметрии цикла кручения  $\psi_\tau$ , от соответственно предела прочности  $\sigma_b$  материала вала, полиномиальная зависимость  $\lambda = -7,043(Z_\varepsilon^2)^2 + 20,61(Z_\varepsilon^2) - 13,21$  раскрывающая коэффициент  $Z_\varepsilon^2$ , учитывающий влияние величины  $\varepsilon_\alpha$  на нагрузочную способность зубчатой передачи;

- обоснованы качественные критерии сварных термоупрочненных колец эксцентрикового вала бурового насоса;

- установлены зависимости изменения площади наплавки, ( $S$  мм<sup>2</sup>) и глубины провара, мм от технологических режимов плазменной сварки, а также скоростного режима сварки ( $V$  м/ч) от сварочного тока, ( $I$  А).

- установлены зависимости площади наплавленного металла от типа стыкового сварного соединения полуколец эксцентрикового вала и толщины основного металла  $FCK = 0,02s^2 + 0,12s - 0,28$ .

**Практическая значимость.**

Разработанная методика определения критерия долговечности насосов, основанная на зависимости, отклонений пятна контакта зацепления от действия динамически распределенной нагрузки. Внедрение данной

методики обеспечит эффективное прогнозирование отказов, и более точно определит период капитального ремонта. Коэффициент отклонения пятна контакта внедренный в данной методики, характеризует величину усталостных напряжений что повышает надежность проектирования ответственных элементов насоса.

Установлена причинно-следственная связь между интенсивностью изнашивания  $I$  насоса и зенитным углом  $\alpha$  входа фрезы,  $F_{mp}^D = f \cdot R_D \cdot ctg(\alpha + \mu)$ , данная связь описана  $i \rightarrow \min$ , функцией изменения формы при износе  $P_i(x)$ . Данные зависимости обеспечивают обоснованный выбор оптимальных параметров эффективной мощности приводной установки  $N$ , кВт. в зависимости от влияния износа и сил сопротивления вала-шестерни привода.

Обоснованные параметры плазменной сварки полуколец (диаметр соответствующего электрода  $d$ , мм; сварочный ток  $I$ , А; скорость сварки  $V$  м/ч; глубины провара, мм; площадь соответствующей наплавки  $S$ , мм<sup>2</sup>), устанавливают зависимости между технологическими режимами и качественными критериями плазменной наплавки, что повышает технологический уровень ремонта ответственных деталей привода бурового насоса, формируя высокие значения долговечности.

Разработанный технологичный способ по восстановлению шеек валов насосов с установкой стальных термоупрочненных дополнительно-ремонтных полуколец (ДРК), обеспечивает высокую износостойкость и усталостную прочность структурных элементов бурового насоса. Способ восстановления методом установки термоупрочненных колец на 7% повышает ресурсную долговечность и межремонтный период высоконагруженных узлов насоса буровой установки при оптимальном соотношении между затратами и производительностью.

Разработанная конструктивная система привода бурового насоса с эксцентриковым механизмом регулирования зазора шестерен, обеспечивает оптимальное регулирование зазора зацепления шестерен трансмиссионных и эксцентриковых валов и глубины зацепления зубьев, обеспечивая длительное время сохранения оптимальных параметров на разных режимах нагружения, повышая эффективность и ресурсную долговечность бурового насоса. Разработанная конструкция регулировки обеспечит снижение интенсивности изнашивания зубьев шестерен и расширяет диапазон межосевого расстояния валов, а также снижение динамических нагрузок на трансмиссионный вал бурового насоса.

Рассчитанная схема полей допусков оригинального клина (шпонки) в плоскости прилегания позволяет обеспечить плавное перемещение регулировочных элементов без заклинивания. Использование полей допусков неподвижного сухарика позволяет оригинальные детали изготовить в условиях производства насосов буровых установок.

Разработанная гидравлическая схема привода эксцентрикового механизма регулирующего зазор в зацеплении, позволяет исключить человеческий фактор и обеспечивает в автономном режиме регулирование

зазора за счет изменения моментов сил и давления в плоскостях зацепления шестерен.

#### **Связь с государственными программами.**

Работа проводилась в рамках грантовых исследований МОН РК на тему ИРН АРО8856129 «Разработка и внедрение новой энергоэффективной технологии лазерно-плазменного изготовления высокопроизводительного глубинно-насосного комплекса добычи углеводородов на малодебитных нефтегазовых скважинах с рекуперативным приводом». Результаты исследований, представленные в диссертации направлены на решение задач развития промышленного машиностроения, описанные в Государственной программе индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 годы, Министерством по инвестициям и развитию Республики Казахстан, а также согласуются с стратегическими целями развития Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020-2025 годы направленной на достижение конкурентоспособности машиностроительной отрасли Республики Казахстан на внутреннем и внешних рынках, в решении задач связанных с увеличением технологических мощностей посредством стимулирования развития базовых производств и реализации стратегических проектов.

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

- методика и алгоритм определения долговечности нагруженных структурных элементов поршневого насоса, учитывающая неравномерное распределение моментов сил по трансмиссионному валу шестерня при смещении площади контакта относительно оси симметрии зуба шестерни привода бурового насоса;

- усовершенствованная математическая модель процесса изнашивания шестерни вала, учитывающая локализацию контактных напряжений при неравномерности распределения динамической нагрузки  $\theta$  и коэффициента долговечности при определенной твердости поверхности.

- обоснованные критерии эффективной работы бурового насоса и зависимости, регламентирующие предельно-допустимые значения технико-эксплуатационных показателей с учетом удельной производительности при непостоянных нагрузочных режимах,

- методика обоснования качественных критериев сварных термоупрочненных колец эксцентрикового вала бурового насоса при установленных зависимостях оптимизации сварочных режимов плазменной наплавки.

- эффективные конструктивно-технологические параметры дополнительно ремонтных деталей и технологичный способ восстановления эксцентрикового вала бурового насоса при внедрении стальных термоупрочненных колец.

- разработанная инновационная конструктивная система привода бурового насоса с принципиально новым эксцентриковым механизмом регулирования зазора шестерен.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационного исследования были доложены и обсуждены на МНПК «Козыбаевские чтения: Евразийский потенциал и новые возможности развития в условиях глобальных вызовов» г. Петропавловск. (16.11. 2018 г.), МНПК «Молодежь и наука – 2019», СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск. (12.04.2019 г.), Universiti Malaysia Perlis, The 5th International Conference on Green Design and Manufacture 2019, IConGDM 2019 – Bandung, Indonesia 29-30 April 2019 AIP Conference Proceedingsthis link is disabled, 2019, 2129, 020022, МНПК «Козыбаевские чтения», СКУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, (20. 11. 2020 г.), Научной стажировки в «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (СибАДИ), «Института дополнительного образования» по направлению «Математическое моделирование и теория принятия решений» (г. Омск, 02-08. 06. 2019 г.), а также по направлению «Эксплуатация грузоподъемных машин и механизмов в производственном предприятии» (г. Омск, 25.02.-11.03. 2021г.), техническом совещании инженерно-технических работников ТОО «Завод многопрофильного оборудования» (ЗМО) (г. Петропавловск – 16.09.2021г.), Петербургском Международном Инновационном форуме (г. Санкт-Петербург 10-12.11.2021г.), НТК "Материалы и технологии" Политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург 13.11.2021г.).

**Публикации.** Основные результаты исследований были отражены в 12 научных работах, в том числе, опубликовано 2 статьи в международных рецензируемых научных изданиях имеющихся в базе данных Scopus (Скопус) показатель процентиля по CiteScore (СайтСкор) не менее 71 и 58; в научных изданиях рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК -2 статьи; также результаты отраженных в 7-и трудах международных конференций, в том числе 1-ой зарубежной проиндексированной в базе данных Scopus (Скопус). Основные результаты исследований нашли отражение в одном опубликованном патенте № 6364 KZ на полезную модель.

**Личный вклад автора.** Основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования, получены автором самостоятельно. В опубликованных научных работах в составе коллектива соавторов, соискателю принадлежит ведущая роль при обобщении и анализе полученных результатов.

#### **Результаты исследований.**

При реализации диссертационного исследования получены результаты, которые способствуют повышению ресурса и обеспечению долговечности насосов колонкового бурения, за счет разработки конструктивно-технологических решений по снижению динамических нагрузок. Ресурсная долговечность привода трансмиссионного вала-шестерни, как основного приводного силового агрегат бурового насоса, достигнута за счет разработки системы регулирования зазора зацепления шестерни трансмиссионного вала, обеспечивающая перераспределение нагрузки и моментов в зависимости от режимов эксплуатации и сопротивлений. Предложен технологичный способ

восстановления изношенных шеек эксцентрикового вала насоса методом установки термоупрочненных колец замкового типа, что позволяет расширить ряд ремонтных размеров вала и исключает прямое термическое воздействие на основу вала насоса.

Разработана методика оценки причинно-следственной связи между эксплуатационными режимами работы буровой, силами сопротивления на рабочем органе и изнашиванием элементов бурового насоса.

Получены зависимости, устанавливающие связь между параметрами и режимами эксплуатации бурового насоса и усталостными напряжениями в изношенной шестерни трансмиссионного вала; усовершенствованная математическая модель динамических процессов приводной части поршневого насоса, позволяет учесть крутильные колебания, неравномерность крутящих моментов и угловых скоростей, влияющие на концентрации напряжений в поршневом насосе.

Установленные зависимости качественных параметров технологии восстановления трансмиссионного вала насоса от технологических режимов позволили управлять и минимизировать усталостные напряжения и дефекты.

Применение полученных результатов исследований при конструировании насосов буровых установок, позволит повысить их ресурс работы, и обеспечит высокую долговечность и эффективность энергетической машины и бурового комплекса на всех режимах работы.

#### **Работы, опубликованные по теме диссертации.**

1. Колисниченко С.Н., Колисниченко С.В., Кожанов В.С. Проблемы в повышении эффективности эксплуатации и долговечности работы буровых поршневых насосов//Материалы международной научно-практической конференции «Козыбаевские чтения-2018: Евразийский потенциал и новые возможности развития в условиях глобальных вызовов» Т2.-Петропавловск: СКГУ им. М. Козыбаева, 2018. С. 276-277

2. Колисниченко С.Н., Савинкин В.В., Томашец А.К. К вопросу восстановления сложных дефектов базовых деталей военной Бронетехники//Материалы МНПК «Козыбаевские чтения-2018: Евразийский потенциал и новые возможности развития в условиях глобальных вызовов» Т2.-Петропавловск: СКГУ им. М. Козыбаева, 2018. С. 328-331

3. Колисниченко С.Н., Жакупов М.А., Савинкин В.В. Перспективные способы восстановления ходовой части военной гусеничной Техники// Материалы МНПК «Козыбаевские чтения-2018: Евразийский потенциал и новые возможности развития в условиях глобальных вызовов», Т2.-Петропавловск: СКГУ им. М. Козыбаева, 2018. С. 227-229

4. Колисниченко С.В., Софьин А.А. Анализ энергоэффективности и перспектив современных конструкций буровых насосов для установок колонкового бурения//МНПК «Молодежь и наука – 2019», СКГУ им.М. Козыбаева, г. Петропавловск. 2019. –С. 61-65

5. Savinkin V. V., Ratushnaya T. Yu., Ivanishev A. A. , Surleva A. R, Ivanova O. V., Kolisnichenko S. N. «Study on the Optimal Phase Structure of Recovered Steam Turbine Blades Using Different Technological Spray Modes for

Deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>»//Universiti Malaysia Perlis, The 5th International Conference on Green Design and Manufacture 2019, IConGDM 2019 – Bandung, Indonesia 2019.

6. Колисниченко С.Н., Савинкин В.В., Колисниченко С.В. Исследование динамических параметров двух и трехпоршневых насосов бурового комплекса// Материалы МНПК «Козыбаевские чтения», СКУ им.М. Козыбаева, г. Петропавловск, 2020, С.291-295.

7. Жумекенова З.Ж., Савинкин В.В. Колисниченко С.Н., К вопросу перспективных технологий восстановления поверхностей изнашивания// Вестник КазНИТУ, №2- Алматы, 2020,С.170-177

8. Колисниченко С.Н., В.В. Савинкин, С.В. Колисниченко, Киселев Л.А., Кузнецова В.Н. Повышение ресурса насоса буровой установки путем восстановления геометрических параметров шеек валов термоупрочненными кольцами // Вестник КазНИТУ, №4- Алматы, 2020г.С.530-534

9. Савинкин В.В., Колисниченко С.Н., Колисниченко С.В., Коптяев Д.А., Жумекенова З.Ж. Исследование динамической модели кривошипно-ползунного механизма поршневых насосов бурового комплекса//МНПК «Молодежь и наука – 2021», Т4- Петропавловск, 2021,С.377-380

10. Savinkin V. V., Kolisnichenko S. N., Sandu A. V., Ivanova O. V., Vizureanu P., Zhumekenova Z. Z. Investigation of the strength parameters of drilling pumps during the formation of contact stresses in gears // Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(15), 7076 <https://doi.org/10.3390/app11157076>

11. Savinkin V. V., Zhumekenova Z. Zh., Sandu A. V., Vizureanu P., Kolisnichenko S. N., Savinkin S. V., Ivanova O.V. Study of wear and redistribution dynamic forces of wheel pairs restored by a wear-resistant coating 15Cr17Ni12V3F/ Coatings, 2021, 11(12), 1441 <https://doi.org/10.3390/coatings11121441>

12. Патент № 6364 РК на полезную модель. Буровой насос с эксцентриковым механизмом регулирования зазора шестерен/ Колисниченко С.Н., Савинкин В.В; опубл. 27.08.2021г., Бюл. №34-5с.