АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Ивановой Ольги Владимировны
«Разработка конструктивно-технологических решений по увеличению ресурса штанговых глубинных насосов», представленной на соискание
ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе
8D07101 – «Машиностроение»

Актуальность работы. Машиностроение является базовой системообразующей отраслью экономики любого индустриально развитого государства. Данная отрасль обеспечивает технологическую устойчивость ключевых отраслей экономики – энергетического, горно-металлургического и агропромышленного комплексов, строительной и транспортной отраслей. Машиностроение обладает высоким мультипликативным эффектом на смежные отрасли, создает спрос на высокопродуктивные услуги, являясь одной из наиболее инновативных отраслей промышленности, способствует усложнению производимой продукции, устойчивому повышению экспортных доходов, и как следствие, пополнению государственного бюджета, техническому прогрессу и общему росту качества жизни населения.

Одну из ключевых ролей в машиностроении играет нефтегазовый комплекс государства. Нефтегазовый комплекс Казахстана играет ведущую роль в экономическом развитии страны и занимает одну из лидирующих позиций на мировом рынке добычи нефти и газа. По данным Управления энергетической информацией США Казахстан занимает 17 место среди стран в мире по добыче нефти. Казахстанское машиностроение охватывает 10 видов экономической деятельности страны. Одним из главных направлений в машиностроении является производство оборудования и запасных частей для машин и предприятий нефтегазовой отрасли, например, таких как насосное оборудование, станки-качалки, запорная арматура, оборудование для фильтрования нефти и газов и т.д.

В Казахстане около 200 действующих нефтегазовых месторождений, из которых 50% приходится на месторождения, находящиеся на поздней стации разработки (с дебитом менее 40 $м^3$/сут), которые эксплуатируются штанговыми глубинными насосами.

Среднегодовая потребность национальных компаний в новых насосах составляет 70% от действующего фонда. Не смотря на надежность и особенность использования ШГН на малодебитных скважинах осложняющие условия работы приводят к отказу насоса раньше установленного ресурса (350 суток) вместо 570 – 600 суток. На долю отказов ШГН приходится более 34% от общего количества отказов других видов насосов. Нефтяная промышленность Казахстана – одна из важнейших отраслей экономики Казахстана. При высокой динамике сокращения мировых запасов нефти вопрос увеличения объемов её добычи в настоящее время не теряет своей актуальности.

Таким образом, перед нефтедобывающими предприятиями стоит научно-практическая проблема, связанная с увеличением добычи углеводородов не только за счет разведки и разработки новых месторождений, но и за счет

усовершенствования и создания новых энергоэффективных добывающих насосных комплексов с высокой ресурсной долговечностью и их использования на месторождениях с мало- и средне дебитными скважинами, что подтверждает актуальность исследований.

Вопросами исследования износа, методов обеспечения ресурсной долговечности и работоспособности, технологией изготовления и модернизации основных элементов конструкции скважинных штанговых глубинных насосов занимались ведущие казахстанские и зарубежные ученые Агамирзоев Д.И., Адонин А.Н., Александров П.О., Аливердизаде К.С., Арбузов В.Н., Бахтизин Р.Н., Бекетов С.Б., Буров Е.А., Валеев М.Д., Вирновский А.С., Воскобойников А.А., Галимуллин М.Л., Грайфер В.И., Долов Т.Р., Дубинов Ю.С., Залятов М.М., Ивановский В.Н., Исмагилов Ф.Г., Ишмурзин А.А., Ишмухаметов Б.Х., Коршунов В.Н., Латыпов Б.М., Машков В.А., Минликаев В.З., Муравьев И.М., Пирвердяна А.М., Султановым Б.З., Топольников А.С., Уразаков К.Р., Хамитов А.Т., Хоанг Т.Н., Юрчук А.М., Al-Taq A.A., John F. Mabry, Neil Robert Hall, Nielsen Jr William D., D.A. Shock, J.O. Sudbury, J.J. Crockett и многие другие.

Цель диссертационной работы – Обеспечить высокую долговечность нефтедобывающего насоса за счет технологии лазерного упрочнения внутренних поверхностей ответственных деталей и повысить его эффективность путем разработки конструкторских решений в клапанном узле и системе фильтрации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать и обосновать критерии отказов штангового насоса, снижающие эффективность его работоспособности при воздействии динамических сил сопротивления на изнашиваемые элементы системы «плунжер-цилиндр».
- усовершенствовать математическую модель работоспособности и производительности нефтедобывающего насоса при динамическом режиме эксплуатации;
- установить зависимость изменения износа от отклонения проектной траектории движения сопряженных деталей относительно оси симметрии при знакопеременных динамических нагрузках;
- на основе экспериментальных данных выполнить имитационное моделирование динамического процесса работы штангового глубинного насоса с учетом влияния различных факторов на показатели надежности и работоспособности скважинной насосной установки;
- разработать технологию упрочнения внутренней поверхности цилиндра насоса с применением высококонцентрированных источников лазерной энергии;
- усовершенствовать клапанный механизм, обеспечивающий эффект демпфирования ударных нагрузок.

Методы исследования. В диссертационной работе использовались методы научных исследований, применяемых в машиностроении, основанных на фундаментальных положениях базовых наук и производства: технология

машиностроения, материаловедение, конструкционные материалы и термообработка, основы конструирования и детали машин, математическая статистика.

Теоретические исследования основывались на применении методов теории численных решений математических задач с применением имитационного 3D моделирования. Для подтверждения достоверности результатов исследования процесс имитационного 3D моделирования проводился с применением следующих лицензионных программных продуктов: КОМПАС-3D (приложение APM FEM), SolidWorks (приложение FloEFD), MatLab. При проведении эксперимента использовался методом металлографического исследования.

Объектом исследования. Скважинный штанговый глубинный насос для подъема нефтяного флюида из средне- и малодебитных скважин и способы увеличения его ресурсной долговечности. Насос работает в условиях, осложненных повышенной вязкостью нефти, значительным содержанием механических примесей, асфальтосмолопарафиновых отложений и солей.

Предмет исследования. Способ повышения надежности и ресурсной долговечности изнашиваемых элементов системы «цилиндр – плунжер – клапанная пара» в процессе эксплуатации штангового глубинного насоса.

Научная новизна диссертационной работы заключается в установлении причинно-следственной связи между условиями и режимами работы насоса, его долговечностью от его технологических и конструкционных параметров, которая отражена в следующих положениях:

- обоснованы критерии отказов ($\delta_t>0,2$ *мм*, $q_t>0,5Q_ф$) штангового насоса, снижающие эффективность его работы при воздействии динамических сил сопротивления на изнашиваемые элементы системы «плунжер-цилиндр»;
- усовершенствована математическая модель, описывающая процесс подачи насоса ($Q_ф$) при изменении величины предельно-допустимого зазора $\delta_t=f(i)$ в системе «плунжер-цилиндр» штангового насоса и утечек (q_t) из-за нарушения кинематики движения ($\Delta\lambda_\Sigma$) от динамических нагрузок;
- обоснована эффективность применения композитного материала, обеспечивающий распределение контактных напряжений по площади соударения запорного элемента в области «условного меридиана» о посадочную поверхность седла;
- обоснованы оптимальные технологические режимы напыления ($v_н$, $l_н$, m_h) и мощностные характеристики (P, q, $d_л$) лазерной установки;
- установлены зависимости изменения физико-механических свойств упрочненной поверхности (Нμ, $\sigma_{сц}$) от толщины напыления (h), дистанции ($l_н$) и скорости напыления ($v_н$), обеспечивающие качественные критерии изготовления цилиндра;
- обоснован способ повышения надежности ШГН путем фильтрации нефти за счет внедрения самоочищающегося фильтра центробежного действия с отбором мощности от подъема нефти.

Практическая значимость.

Разработанные конструкция и технология изготовления запирающего элемента клапанной пары «седло-шар» плунжерного насоса, с применением комбинированных материалов, обеспечивают эффективное прилегание шара к седлу, исключая утечки, уменьшают разрушение рабочей кромки седла и позволяют эффективно перераспределять ударные нагрузки за счет достигнутого демпфирующего эффекта.

Разработанная лазерная технология изготовления и упрочнения внутренней поверхности контактирующей пары «плунжер-цилиндр» малого диаметра (44 мм) добывающих насосов, позволяет получить высокое качество (σ, пористость<7%, Ki) поверхности упрочнения, имеющей оптимальные значения толщины покрытия (h), микротвердости поверхности (Hμ), твердости поверхностного слоя (61÷65 HRC), полное сплавление порошкового материала, эффективное сплавление частиц основного металла с напыляемой поверхностью, уменьшить термическое воздействие на основной металл и снизить уровень остаточных деформаций и напряжений в цилиндре насоса.

Разработанная конструкция управляемой установки для лазерного напыления позволяет наносить покрытия из многокомпонентных порошковых материалов на внутреннюю поверхность длинномерного цилиндра (до 6 м) малого диаметра (44 мм) скважинного штангового глубинного насоса, обеспечивая непрерывный и равномерный процесс лазерного напыления. А лазерный импульс обеспечивает высокое качество напыления, адгезионные свойства и исключает перегрев поверхности в зоне термического влияния.

Разработанная конструкция самоочищающегося фильтра центробежного действия, на которую получен инновационный патент на полезную модель РК № 6888 от 25.02.2022г. бюл. № 8, обеспечивает высокий ресурс насоса за счет гравитационного эффекта подъема-опускания нефти и эффективной очистки от механических примесей, сбрасываемых в забой скважины. Под давлением нефтяной жидкости, пропускаемой через отверстия под углом (α=5÷15°) к оси фильтра, проходя металлические лопасти, обеспечивает вращение фильтра на подшипнике. Под действием центробежной силы крупные взвеси примесей задерживаются на внешних стенках фильтра, большая часть которых остается в забое скважины, а другая часть этой же силой выдавливается в отверстия фильтра, которые в свою очередь очищаются коронкой.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- усовершенствованная математическая модель, описывающая процесс подачи насоса ($Q_ф$) при изменении величины предельно-допустимого зазора $\delta_t=f(i)$ в системе «плунжер-цилиндр» штангового насоса и утечек (q_t) из-за нарушения кинематики движения ($\Delta\lambda_\Sigma$) от динамических нагрузок;
- установленные зависимости и эффективные пределы изменения физико-механических свойств поверхности упрочнения от технологических режимов напыления ($v_н$, $l_н$, m_h) с учетом мощностных характеристик (P, q, $d_л$) лазерной установки;

- зависимости изменения адгезионных свойств покрытия от мощностных режимов лазерного импульса и твердости упрочненного слоя от расстояния до фокальной плоскости;
- конструкция и технология изготовления запорного элемента клапанной пары «седло-шар» плунжерного насоса, с применением комбинированных материалов (Сталь 20 ГОСТ 2590-88 и композитная резиновая смесь марки 7В-14МА ТУ 38-105-1082-86 с металлокерамическим наполнителем);
- оптимальные технологические режимы напыления ($v_н$, $l_н$, m_h) и мощностные характеристики (P, q, $d_л$) лазерной установки;
- управляемая установка для лазерного напыления внутренней поверхности длинномерных цилиндров (до 6 м) малого диаметра (44 мм);
- конструкция самоочищающегося фильтра штангового глубинного насоса.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационного исследования представлены и получили апробацию на международных и казахстанских научно-практических конференциях и технических семинарах: VI МНПК студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных», СибАДИ (г. Омск, РФ, 10.02.2022г., РИНЦ); МНПК «Тенденции развития естественных и технических наук в современном мире», Kozybayev University (г. Петропавловск, Казахстан, 18.11.2022г.); техническое совещание инженерно-технических работников ТОО «Венчурная фирма «Поиск» (г. Петропавловск, 25.10.2022г.); International Conference on Innovative Research «EUROINVENT ICIR 2023», Iasi, 11th-12th of May 2023; научная стажировка в «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) (г. Москва, РФ, 10.05.–09.06.2023г.); Республиканский научно-практический семинар «Инновационные технологии в машиностроении и робототехнике» (г. Петропавловск, СКУ им. М.Козыбаева, 15.04.2024г.).

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 1 статья в изданиях, рекомендованных КОКСНВО РК (Список 1); 4 публикации в Международных научных конференциях, из них 3 – в зарубежных; 3 статьи в научных зарубежных журналах, входящих в базу научного цитирования Scopus – Q1, Q2 и Q3 (категория General Engineering; категория Materials Science/Surfaces and Interfaces; категория Metals and Alloys/Engineering main heading); 1 монография, опубликована издательством Materials Research Forum LLC Millersville, PA, USA в серии книг Materials Research Foundations; 1 статья в зарубежном научном журнале. Получен инновационных патента на полезную модель РК (№ 6888 от 25.02.2022 г., Бюл. № 8) и один акт внедрения в производство.

Личный вклад автора.

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

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 189 страницах, содержит 91 рисунок, 20 таблиц, 5 приложений и список литературы из 194 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Результаты исследования.

Для реализации технологических решений по повышению ресурсной долговечности штангового насоса, обоснованы критерии отказов ($\delta_t>0,2$ мм, $q_t>0,5Q_ф$ м^3/сут), снижающие эффективность его работы при воздействии динамических сил сопротивления на изнашиваемые элементы системы «плунжер-цилиндр».

Усовершенствована математическая модель производительности насоса ($Q_ф$) и его ресурсной долговечности при изменении величины предельно-допустимого зазора $\delta_t=f(i)$ в системе «плунжер-цилиндр» штангового насоса и утечек (q_t) из-за нарушения кинематики движения ($\Delta\lambda_\Sigma$) от динамических нагрузок, физико-механических свойств упрочненной внутренней поверхности цилиндра.

Для обеспечения требования по скорости (v>0,1 м/с) посадки запорного элемента разработана составная конструкция шара, состоящая из стального шара внутри и композитной резиновой оболочки снаружи, для создания упругого эффекта закрытия клапана. В качестве наполнителя для резиновой смеси выбран керамический материал на базе диоксида циркония (ZrO_2).

Обоснована эффективность применения композитного материала (Сталь 20 ГОСТ 2590-88 и композитная резиновая смесь марки 7В-14МА ТУ 38-105-1082-86 с металлокерамическим наполнителем), обеспечивающий распределение контактных напряжений по площади соударения запорного элемента в области «условного меридиана» о посадочную поверхность седла.

Разработана конструкция и технология изготовления шара клапанной пары плунжерного насоса из комбинированного материала, обладающего оптимальными демпфирующими свойствами, для создания упругого эффекта закрытия клапана и равномерного перераспределения циклически изменяющейся ударной нагрузки по поверхности контакта.

По результатам эксперимента установлены следующие полиномиальные зависимости: изменение твердости от расстояния до фокальной плоскости: $HRC=-0,0119x_8^2+1,6283x_8+2,8517$; изменение микротвердости по толщине напыляемого слоя при различных скоростях напыления: $HV=-977,58h^2+2499,70h+3689,50$ при v=15 м/с; изменение прочности сцепления покрытия от вольтамперной характеристики режимов и дистанции напыления: $\sigma_{сц}=-1E-05l_н^3+0,0017l_н^2+0,3040l_н-17,6380$. Максимальное значение прочности сцепления покрытия достигается при дистанции напыления $l_н=10$ мм и напряжении $U=170$ В.

Разработанная лазерная технология изготовления и упрочнения внутренней поверхности контактирующей пары «плунжер-цилиндр» малого диаметра (44 мм) добывающих насосов, позволяет получить высокое качество (σ, пористость<7%, K_i) поверхности упрочнения, имеющей оптимальные

значения толщины покрытия (h), микротвердости поверхности (Hμ), твердости поверхностного слоя (61÷65 HRC), полное сплавление порошкового материала, эффективное сплавление частиц основного металла с напыляемой поверхностью, уменьшить термическое воздействие на основной металл и снизить уровень остаточных деформаций и напряжений в цилиндре насоса.

Для достижения оптимальных значений микротвердости поверхности насоса (670 HV) найдена оптимальная переходная зона наплавления материала 0,8÷1,45 мм. Высокая микротвердость достигнута при оптимально дистанции 10-15 мм и скорости наплавки 15 мм/с. Дальнейшее увеличение переходной зоны до 1,45 мм существенно не изменяет микротвердости, а с увеличением толщины до 1,6 мм резко снижается микротвердость.

Для повышения эксплуатационных параметров (Hμ, Ra, σ_{cu}) упрочненной поверхности обоснованы оптимальные характеристики высококонцентрированного источника лазерной энергии и оптимальные режимы упрочнения внутренней поверхности цилиндра: мощность излучения 2000…3000 Вт; скорость напыления 10÷15 мм/с; диаметр пятна фокусирования излучения 1,5…2,5 мм; диаметр обрабатывающего лазерного пятна – 5÷10 мм; плотность энергии лазерного луча – $3 \cdot 10^5$ Вт/см^2; расстояние от фокальной плоскости – 15 мм; массовый расход наплавочного порошка 0,25 г/с.

Разработанная конструкция управляемой установки для лазерного напыления позволяет наносить покрытия из многокомпонентных порошковых материалов на внутреннюю поверхность длинномерного цилиндра (до 6 м) малого диаметра (44 мм) скважинного штангового глубинного насоса, обеспечивая непрерывный и равномерный процесс лазерного напыления.

Обоснован способ повышения надежности ШГН путем фильтрации нефти от механических примесей. Данная конструкция позволяет снизить засорение фильтра и насоса, а также получить эффект самоочищения фильтра за счет гравитационного эффекта подъема-опускания нефти.

Работы, опубликованные о теме диссертации:

1. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Sandu A.V., Ivanova O.V., Petrica Vizureanu, Zhumekenova Z.Zh. Investigation of the strength parameters of drilling pumps during the formation of contact stresses in gears / Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(15), 7076. Квартиль журнала (Q1, JCR) согласно базе данных SCOPUS (SJR), процентиль по CiteScore Scopus – 81 (категория Materials Science/General Materials Science) https: //doi.org/10.3390/app11157076

2. Иванова О.В. Анализ перспектив развития трубопроводного транспорта нефтепродуктов / Сборник материалов VI МНПК студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных». СибАДИ, г. Омск, РФ. 10.02.2022. – С. 9-11, eLIBRARY ID: 48820195, РИНЦ https://elibrary.ru/item.asp?id=48820195

3. Иванова О.В. Анализ способов повышения эффективности малодебитных скважин / Сборник материалов VI МНПК студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных», СибАДИ, г. Омск, РФ. 10.02.2022. – С. 61-64, eLIBRARY ID: 48820207, РИНЦ https://elibrary.ru/item.asp?id=48820207

4. Савинкин В.В., Иванова О.В., Мацепура Е.А., Колисниченко С.Н., Сень Д.О. Скважинный самоочищающийся фильтр центробежного действия. Патент на полезную модель № 6888 Республика Казахстан, №2022/0010.2 заяв. 11.01.2022; опубл. 25.02.2022г., бюл. № 8.

5. Иванова О.В., Ратушная Т.Ю., Иванов Е.А. Анализ современных технологий повышения долговечности клапанного узла нефтедобывающего штангового глубинного насоса / Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Тенденции развития естественных и технических наук в современном мире», посвященная 85-летию Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, 18.11.2022. – С. 572-579 https://ku.edu.kz/ru/page/view?id=2362

6. Ivanova O.V., Savinkin V.V., Sandu A.V. The study of structural materials 95Х18Ш in conjunction with a rubber mixture of group VI and polyurethane grade ПУ СКУ-ПФЛ-100 with damping properties / International Conference on Innovative Research «EUROINVENT ICIR 2023», Iasi, 11th-12th of May 2023. – p. 98 http://www.euroinvent.org/cat/ICIR_2023.pdf

7. Savinkin V.V., Ivanova O.V., Zhumekenova Z.Zh., Sandu A.V. and Vizureanu P. Effect of New Design of the Laser Installation and Spraying Method on the Physical and Mechanical Properties the Inner Surface a Small Diameter Coated with 15Crl7Nil2V3F35ZrO_2. / Coatings 2023, 13, 514. Импакт-фактор 3,236; квартиль журнала (Q2, JCR) согласно базе данных SCOPUS (SJR), процентиль по CiteScore Scopus – 73 (категория Materials Science/Surfaces, Coatings and Films) https://doi.org/10.3390/coatings13030514

8. Savinkin V.V., Ivanova O.V., Sandu A.V., Kolisnichenko S.N. Ensuring the Durability of Oil-Producing Pumps Through the Use of Laser Spraying Technology. Monograph/ V.V. Savinkin, O.V. Ivanova, A. Sandu, S.N. Kolisnichenko. – Materials Research Forum LLC, USA, Volume 144 (2023). – 121 c. https://www.mrforum.com/product/ensuring-the-durability-of-oil-producing-pumps/

9. Savinkin V.V., Ivanova O.V., Zhumekenova Z.Zh. Research of Modern Technologies for the Restoration of Structural Elements of Mining Pumps: Advantages and Disadvantages, Promising Technologies / European Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 8, Issue 1, 2023: 22-29 DOI: 10.36868/cjmsc.2023.08.01.022 https://ejmse.ro/articles/08_01_03_EJMSE-22-186.pdf

10. Ivanova, O.V., Savinkin V.V. Investigation of the Durability Parameters and Justification of the Effectiveness of the New Model of the Valve Assembly of the Rod Depth Pump. *Eurasian Physical Technical Journal*, 23, 2 (56), pp. 67–77, (КОКСНВО, Список 1, Q3, процентиль по CiteScore Scopus – 26, Section General Engineering, Published online: 30/06/2026), DOI: https://doi.org/10.31489/2026N2/67-77.

11. Ivanova**,** O.V., Sandu, A.V., Savinkin V.V., Sandu, I.G., Vizureanu, P. Investigation of Rod Pump Wear During Changes in Load Dynamics and the Design Trajectory of the Rod. *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 71, no. 2, June 2026, pp. 441-57, (Q3, процентиль по CiteScore Scopus – 32, Section Metals and Alloys. Engineering main heading. Kinematics), DOI: https://doi.org/10.24425/amm.2026.158823.