

На правах рукописи



СИЛЬНОВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫВОДА
НА РЕЖИМ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫМИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСНЫМИ
СИСТЕМАМИ**

Специальность 05.02.13 Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Уразаков Камил Рахматуллович
Официальные оппоненты:	Дроздов Александр Николаевич доктор технических наук, профессор Инженерная академия ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»/ профессор департамента недропользования и нефтегазового дела (г. Москва)
	Деговцов Алексей Валентинович кандидат технических наук, доцент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина/ доцент кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности (г. Москва)
Ведущая организация	«Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти» ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина (г. Бугульма)

Защита диссертации состоится «23» сентября 2022 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.291.02 при ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» и на сайте www.ugtu.net

Автореферат разослан «18 » августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лютов Александр Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из заметных тенденций в области механизированной добычи нефти за последнее десятилетие является увеличение доли установок электроприводного центробежного насоса (УЭЦН) относительно других способов добычи нефти. Фонд действующих скважин, эксплуатируемых данными установками в России, за 2008–2019 годы вырос на 55 %. При вводе в эксплуатацию УЭЦН важным этапом является вывод скважины на стационарный (установившийся) режим работы. Основная задача данного этапа - сохранить ресурс УЭЦН и избежать осложнений, отказов и аварийных ситуаций.

С развитием в последние годы средств автоматизации, удаленного мониторинга и управления в распоряжении технологического персонала появились инструменты контроля вывода скважин с УЭЦН на стационарный режим работы. Однако, как показывает практика, сохранить ресурс УЭЦН при выводе скважин на режим не всегда удается. Согласно промысловой статистике нефтедобывающих компаний, до 10 % технологических операций по выводу на стационарный режим работы (ВНР) скважин механизированного фонда сопровождаются осложнениями, которые завершаются либо отказами УЭЦН, либо требуют длительных во времени восстановительных мероприятий.

Основной причиной неуспешности ВНР является недостаточность притока из пласта в начальный момент времени, и как следствие, невозможность обеспечения необходимого значения уровня погружения УЭЦН в жидкости, снижение которого может привести к срыву подачи УЭЦН и перегреву двигателя. Кроме того, как правило, перед подземным ремонтом скважин производится глушение скважин жидкостью, отличающейся по свойствам от пластового флюида. Поэтому в начальной стадии вывода скважины на стационарный режим работы после запуска УЭЦН в работу производится откачка преимущественно жидкости глушения из затрубного пространства, причем жидкость поступает на прием насоса, не омывая погружной электродвигатель (ПЭД). Следствием этого являются случаи перегрева ПЭД и выхода его из строя.

В этой связи для повышения работоспособности и эффективности насосной установки в процессе ввода УЭЦН в эксплуатацию актуальным является исследование и совершенствование технологического процесса работы УЭЦН при ВНР, разработка и модернизация технических устройств стабилизации динамического уровня жидкости и охлаждения ПЭД. А также создание автоматических систем контроля и управления процессом работы УЭЦН в скважине, оборудованных УЭЦН, учитывающих влияния изменения продуктивности пласта и свойств откачиваемой жидкости на параметры работы насосной установки.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами повышения работоспособности УЭЦН при эксплуатации и выводе скважин на стационарный режим работы в разное время занимались: Ведерников Ю. А., Гук В.Ю., Ивановский В.Н., Конопля Д.В., Листрицкий В.М., Мальцев Н.В., Мищенко И.Т. и другие. Основные решения, направленные на повышение работоспособности УЭЦН, касались разработки, совершенствования конструкции и эффективности применения технических устройств (например, газосепараторов), технологических систем, в частности, закачки реагентов на прием установки электроприводного центробежного насоса, систем автоматизации (станций управления с интеллектуальными алгоритмами), систем контроля и управления (систем поддержки принятия решений - СППР). Однако комплексного решения, включающего внедрение технических устройств, информационных систем и совершенствование самого процесса вывода скважин на режим не было.

Вопросами совершенствования технических систем для стабилизации режима работы УЭЦН занимались: Аминев М. Х., Давлетов И. Я., Поляков Д. Б., Уразаков К.Р. и другие. Авторами предложены системы, основанные на косвенном определении динамического уровня по значениям затрубного давления, что может быть недостаточно точным.

Существуют также разработки технических устройств для охлаждения ПЭД УЭЦН, но они имеют свои недостатки, связанные с особенностью конструкции или ограниченной областью применения.

Для разработки интеллектуальных алгоритмов и систем поддержки принятия решений требуется разработка математической модели «пласт - скважина - УЭЦН», построение которой рассматривалось в ряде работ применительно к ВНР (Грибенников О.А., Конопля Д.В., Мальцев Н.В., Соловьев И.Г. и другие). Однако в работах сделан акцент на решении узких задач - определении плотности жидкости глушения в затрубном пространстве скважины, прогноз перегрева ПЭД и других. Кроме того, авторами использованы упрощенные модели отдельных элементов УЭЦН, математические модели адаптированы для конкретных месторождений, не учитывающие широкий диапазон параметров эксплуатации и свойства откачиваемой жидкости. К тому же, разработанные модели не учитывают наличие специальных технических устройств, позволяющих стабилизировать динамический уровень жидкости в скважине или охладить ПЭД. Для решения задач, связанных с совершенствованием процесса ввода в эксплуатацию УЭЦН, требуется разработка комплексной математической модели, учитывающей нестационарные процессы в системе «пласт – скважина – УЭЦН», такие как изменение коэффициента продуктивности и замещение жидкости глушения, и их влияние на работу насосной установки.

Соответствие заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют специальности 05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль), а именно областям исследования: «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций», «Исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой».

Цель диссертационной работы

Выявление закономерности влияния коэффициента продуктивности и свойств жидкости глушения на изменение параметров работы УЭЦН при вводе в эксплуатацию для научно обоснованных технологических и технических решений разработки устройства с отклонителем потока жидкости для ограничения роста температуры погружного электродвигателя и системы стабилизации динамического уровня жидкости.

Научная идея

Установление закономерностей формирования температуры погружного электродвигателя и течения многофазного флюида при нестационарном режиме работы пласта и скважины в процессе ее вывода на режим с учетом выноса жидкости глушения и изменения коэффициента продуктивности пласта, с последующим моделированием температурного режима электродвигателя при оборудовании скважины устройством для охлаждения двигателя с отклонителем потока.

Задачи диссертационной работы

1 Анализ влияния осложняющих факторов на работу установок электроприводного центробежного насоса при выводе скважины на режим. Исследование температурного режима насосной установки при откачке жидкостей с переменными характеристиками в условиях нестационарного режима работы скважины.

2 Разработка цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН, включающего усовершенствованную комплексную математическую модель работы установки электроприводного центробежного насоса для нестационарного режима работы в системе «пласт – скважина – УЭЦН».

3 Разработка устройства стабилизации динамического уровня жидкости в скважине, оборудованной электроцентробежным насосом, при выводе на стационарный режим работы.

4 Разработка устройства с отклонителем потока жидкости для ограничения роста температуры погружного электродвигателя путем принудительного его омывания во время вывода скважины на режим.

5 Совершенствование технологического процесса ввода в эксплуатацию электроцентробежных насосных систем путем разработки рекомендаций, основанных на исследовании влияния изменения продуктивности пласта и свойств откачиваемой жидкости на параметры работы УЭЦН.

Научная новизна

1 Разработана и исследована математическая модель работы установок электроприводного центробежного насоса в скважине, описывающая нестационарное течение пластового флюида в элементах системы, учитывающая вынос жидкости глушения и изменение коэффициента продуктивности.

2 Предложено устройство для охлаждения двигателя с отклонителем потока, позволяющим в период выноса жидкости глушения обеспечить омывание и охлаждение ПЭД. Моделированием температурного режима погружного электродвигателя во время ВНР установлено, что при использовании данного устройства температура двигателя может быть снижена в среднем на 10-15°С, а в период пикового нагрева во время выноса жидкости глушения – на 20-22°С.

3 Предложена система стабилизации динамического уровня жидкости при вводе в эксплуатацию УЭЦН. Аналитически установлено, что за счет стабилизации динамического уровня разработанным устройством его контроля исключается риск срыва подачи ЭЦН и обеспечивается рост дебита.

4 Предложен новый алгоритм обеспечения автоматизированного ввода в эксплуатацию УЭЦН с помощью изменения ее режима работы за счет варьирования частоты тока. Данный алгоритм позволяет снизить количество внеплановых остановок УЭЦН из-за срывов подачи и перегрева ПЭД вследствие снижения продуктивности пласта и замещения жидкости глушения пластовым флюидом более чем в 2 раза.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в установлении закономерностей течения многофазного флюида в системе «пласт – скважина – УЭЦН» при нестационарном режиме работы пласта и скважины с учетом выноса жидкости глушения, изменения коэффициента продуктивности пласта. Исследованы закономерности формирования температуры погружного электродвигателя при нестационарном режиме работы пласта и скважины в процессе ее вывода на режим, а также исследован температурный режим электродвигателя при оборудовании скважины устройством для охлаждения двигателя с отклонителем потока.

Практическая значимость заключается в следующем:

1 Разработана система стабилизации динамического уровня жидкости в затрубном пространстве скважины, и на ее основе предложен новый метод снижения рисков срыва подачи электроприводного центробежного насоса при выводе на режим.

2 Разработана конструкция устройства для охлаждения погружного электродвигателя с отклонителем потока жидкости при нестационарном режиме работы пласта и скважины в процессе вывода на режим.

3 Разработаны и внедрены в учебный процесс лабораторный стенд и методическое пособие для исследования работы УЭЦН с устройством для стабилизации динамического уровня жидкости в скважине.

4 Разработана система поддержки принятия решений для обеспечения автоматизированного ввода в эксплуатацию УЭЦН.

Методология и методы исследований

При выполнении диссертационного исследования применялись известные положения механики жидкости и газа, теории математического и компьютерного моделирования, а также методы машинного обучения.

Положения, выносимые на защиту

1 Разработанная математическая модель системы «пласт-скважина-УЭЦН» для нестационарного режима работы скважины, реализованная в форме

цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН. Данная модель описывает нестационарное течение пластового флюида в элементах системы, и учитывает вынос жидкости глушения, изменение параметров работы УЭЦН и коэффициента продуктивности.

2 Конструкция устройства с отклонителем потока для обеспечения охлаждения ПЭД. Применение данного устройства обеспечивает снижение температуры двигателя в среднем на 10-15 °С, а в период пикового нагрева во время выноса жидкости глушения – на 20-22°С, что подтверждается математическим моделированием температурного режима погружного электродвигателя.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанной математической модели, её адекватностью, использованием известных положений инженерных наук, сходимостью результатов численного моделирования с промысловыми данными.

Результаты и основные положения диссертационной работы доложены и обсуждались на международной научной конференции «Наука и образование в современной России» (2010 г.), международной конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле» (2021 г), всероссийской научно-технической конференции «Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации» (2021 г.), международной научной конференции "Наука. Исследования. Практика" (2021 г.), международной конференции «Булатовские чтения» (2022 г.), всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения» (2022 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных трудах, в том числе в 3 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в трех статьях в журналах, индексируемых в Scopus и

Web of Science, в одном патенте РФ, в трех свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ и в одном учебно-методическом пособии.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 181 наименование. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков, 4 таблицы и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов.

В первой главе диссертационной работы приводится анализ особенностей работы УЭЦН при выводе скважины на стационарный режим работы. На примере промысловых данных анализируются основные осложнения при ВНР, формулируются цели и задачи исследования.

По результатам анализа статистического материала (карты ВНР) установлено, что до 10% ВНР заканчиваются отказами глубинно-насосного оборудования или сопровождаются длительными остановками, связанными с восстановительными мероприятиями скважины, увеличивая среднюю длительность ВНР в 3 раза, до 17 суток. При этом основной причиной аварийных отказов УЭЦН при ВНР является снижение/отсутствие подачи, связанное с повышением температурного режима двигателя в начальный период времени.

Исследование технологического процесса работы скважин при ВНР показало необходимость совершенствования существующего подхода в части сокращения временных и материальных затрат из-за остановок и отказов УЭЦН.

Для решения перечисленных вопросов предложено внедрение технических устройств и информационных систем. Для снижения количества остановок УЭЦН предложены устройства для стабилизации динамического уровня и снижения температуры ПЭД. В качестве инструмента автоматизации и контроля ВНР

предложена концепция цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН, включающего в себя следующие элементы:

- математическую модель скважины с насосной установкой, включающая модели пласта, элементы скважины и насосную установку;
- параметры настройки модели, такие как эффективный коэффициент продуктивности, коэффициент деградации напора и мощности УЭЦН и др.;
- алгоритмы адаптации на замерные значения, в том числе удаление выбросов, сглаживание и экстраполяция;
- алгоритмы прогноза режима работы скважины, в том числе определение возможности достижения целевых параметров после смены УЭЦН.

Во второй главе представлено описание разработанной математической модели в системе «пласт – скважина – УЭЦН» для нестационарного режима работы скважины. Данная модель реализована в форме цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН, который, адаптируясь на промысловые данные, позволяет моделировать и прогнозировать технологические параметры работы насоса с учетом переменного коэффициента продуктивности, и процессы фазового замещения жидкости глушения.

При разработке математической модели, приняты следующие допущения: течение является одномерным; газожидкостная смесь состоит из газа, пластовой жидкости, которая является смесью воды, нефти и жидкости глушения; скорости воды и нефти не различаются; изменение параметров при течении потока жидкости в подземной части УЭЦН происходит мгновенно; учет различия между паспортной характеристикой насоса и выдаваемым напором ЭЦН при эксплуатации в скважинных условиях проводится при помощи коэффициента деградации напора.

С учетом описанных выше допущений система уравнений движения смеси будет записана следующим образом:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g u_g) = \Gamma_{og}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(n\rho_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n\rho_s u_s) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial((1-n-\alpha_g)\rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((1-n-\alpha_g)\rho_l u_l) = -\Gamma_{og}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g u_g + n \rho_s u_s + (1-n-\alpha_g)\rho_l u_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g u_g^2 + n \rho_s u_s^2 + (1-n-\alpha_g)\rho_l u_l^2) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau S}{A} - (\alpha_g \rho_g + n \rho_s + (1-n-\alpha_g)\rho_l) g \cos \theta, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q. \quad (5)$$

где t – время (с), x – координата по длине трубы (м), n – объемная доля жидкости глушения в смеси, α_g – объемная доля газа в смеси, u_g , u_l и u_s – их фазовые скорости (м/с), ρ_g , ρ_l и ρ_s – плотности газа, пластовой жидкости и жидкости глушения соответственно (кг/м³), Γ_{og} и Γ_{go} – массовый приток за счет фазовых превращений в системе газ–нефть (кг/(м³·с)), S – периметр трубы (м), p – давление (Па), τ – касательное напряжение на стенке трубы для смеси (Па), T – температура смеси (К), θ – угол наклона трубопровода к вертикали (°), c_v – удельная теплоемкость смеси (Дж/(кг·К)), q – приток тепла за счет теплообмена со стенкой трубы (Дж/(м³·с)), λ – коэффициент теплопроводности смеси (Дж/(м·с·К)), ρ – плотность смеси (кг/м³).

Для прогнозирования притока флюида из пласта при заданном забойном давлении предложено использовать переменный коэффициент продуктивности для аналитической корреляции Вогеля. При этом коэффициент продуктивности должен рассчитываться на основе замерных данных в процессе ВНР по формуле:

$$K_{prod} = K_{prod0} + (K_{prod1} - K_{prod0}) \exp(-\alpha t). \quad (6)$$

где K_{prod0} , K_{prod1} и α – константы, определяемые из условия наилучшей аппроксимации промысловых данных.

Расход смеси через насос определяется из решения уравнения:

$$p_{out} = p_{in} - \rho g H(Q) K_{degr} \left(\frac{F}{F_0} \right)^2, \quad (7)$$

где p_{in} – давление на приеме, p_{out} – давление на выкиде насоса, ρ – плотность перекачиваемой среды, F и F_0 – фактическая и базовая частота вращения вала электродвигателя (Гц), K_{degr} – коэффициент деградации напора насоса:

$$K_{degr} = K_{degr\ gas} \cdot K_{degr\ \mu} \cdot K_{degr\ 0}, \quad (8)$$

где $K_{degr\ gas}$, $K_{degr\ \mu}$ $K_{degr\ 0}$ – коэффициент деградации напора из-за влияния газа, вязкости и износа соответственно.

На Рисунке 1 показаны графики изменения расчетного и замерного дебита жидкости для скважины АЗ месторождения ВЗ Волго-Уральского региона для постоянного и переменного во времени коэффициента продуктивности.

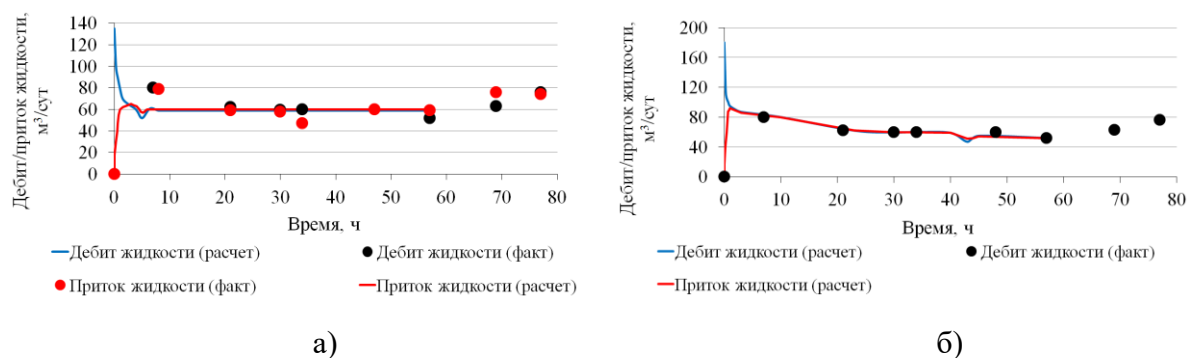


Рисунок 1 – Расчетные и замерные значения дебита и динамического уровня при моделировании пласта с постоянным (а) и переменным (б) коэффициентом продуктивности

Из графиков видно, что переменный во времени коэффициент продуктивности позволяет добиться хорошего согласования замерного и расчетного дебита.

Главной особенностью разработанной модели скважины, отличающей ее от моделей других авторов, является учет движения жидкости глушения в скважине. При реализации модели рассмотрена задача замещения жидкости глушения в скважине пластовой жидкостью. На Рисунке 2 приведено сравнение остаточного замерного и расчетного объемов жидкости глушения для скважины А6 месторождения В6 Западной Сибири при ВНР. Расчетные значения хорошо согласуются с замерными, а полный вынос жидкости глушения из скважины происходит примерно через 40 часов после запуска УЭЦН.

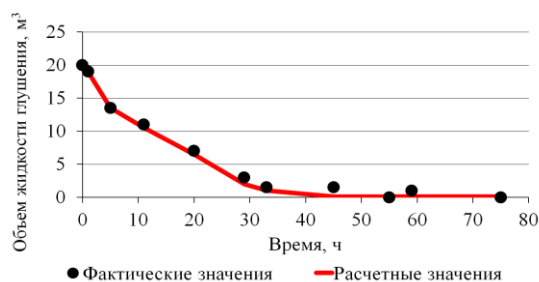


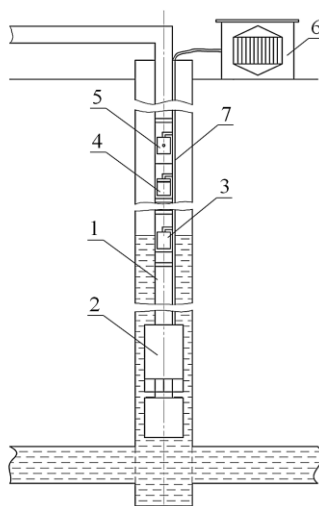
Рисунок 2 – Сравнение расчетного и замерного изменения остаточного объема жидкости глушения

Установлено, что наличие жидкости глушения в скважине во время ВНР влияет на расходно-напорную характеристику ЭЦН. Показана необходимость учета процессов замещения жидкости глушения в процессе ВНР для обеспечения возможности оперативного изменения параметров работы УЭЦН. При этом риски срыва подачи при некорректном подборе режима работы насоса могут отмечаться как на этапе откачки жидкости глушения, так и сразу после замещения ее пластовым флюидом.

Модель учитывает основные физические процессы, происходящие в пласте, скважине и насосном оборудовании, которые влияют на ВНР, а потому является универсальной, что заметно ее отличает от аналогичных моделей других авторов.

В третьей главе описываются разработанные технические устройства, направленные на совершенствование техники и технологии вывода скважины с УЭЦН на стационарный режим работы.

Разработано устройство (Рисунок 3) для стабилизации уровня жидкости, включающее автоматическую систему управления и систему определения динамического уровня, снабженное механизмом перепуска жидкости, позволяющее с достаточной точностью контролировать изменение динамического уровня. На разработанное устройство получен патент РФ 2770776.

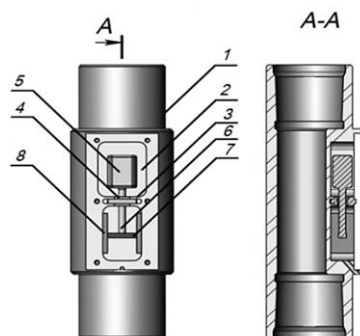


1 – НКТ; 2 – УЭЦН; 3 и 4 – устройство измерения динамического уровня; 5 – механизм перепуска жидкости; 6 – трансформатор; 7 – кабель

Рисунок 3 – Схема устройства для стабилизации уровня жидкости над насосом

Устройство измерения давления (Рисунок 4) представляет собой эксцентриковый корпус 1 с камерой 2, которая разделена перегородкой 3 с сальниковым уплотнением 4 на две гидравлически изолированные друг от друга части. В верхней части находится поплавков 5 на штоке 6, в нижней - контактная пластина 7, замкнутая на токопроводящих пластинах 8. Вся система смонтирована таким образом, чтобы при снижении уровня жидкости над насосом, падение поплавка передавалось на электрическую систему, а изменение при этом сопротивления реостата определялось автоматической системой управления.

Механизм перепуска жидкости (Рисунок 5) состоит из эксцентричного корпуса 1 с отверстием и крестообразного затвора 3 (перегородки). При подъеме затвора создается гидравлический канал, соединяющий полости НКТ и затрубное пространство, причем в нижней части затвора установлен прикрепленный к ней магнит, а в верхней части - две возвратные пружины 2 и стопор. Отверстие на корпусе механизма перепуска жидкости расположено перпендикулярно НКТ.

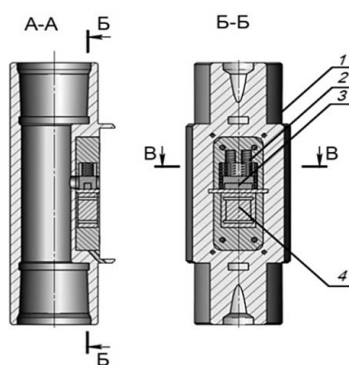


1 – корпус; 2 – камера; 3 – перегородка; 4 – уплотнение; 5 – поплавок; 6 – шток;
7 – контактная пластина; 8 – токопроводящая пластина

Рисунок 4 – Устройство измерения давления

Поэтому при нахождении перегородки в верхнем (открытом) положении происходит сообщение внутренней полости НКТ и затрубного пространства, а при максимальном нижнем положении - перепуск жидкости прекращается.

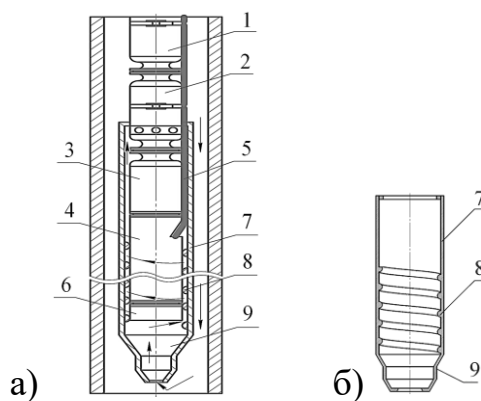
Разработанное устройство для стабилизации уровня жидкости позволит обеспечить непрерывность работы УЭЦН посредством автоматического управления изменением динамического уровня в скважинах, подверженных изменениям режима работы по причине изменения притока, а также в скважинах, где обратные клапаны УЭЦН подвержены ускоренному выходу из строя.



1 – корпус; 2 – пружины; 3 – затвор; 4 – катушка индуктивности

Рисунок 5 – Устройство перепуска жидкости

Для обеспечения охлаждения ПЭД в условиях преимущественного потока жидкости из затрубного пространства в процессе ВНР разработано устройство для охлаждения двигателя с отклонителем потока жидкости (Рисунок 6).



1 – УЭЦН; 2 – входной модуль насоса; 3 – гидрозащита; 4 – ПЭД; 5 – кабель; 6 – ТМС; 7 – защитное устройство; 8– спиралевидные рёбра жёсткости; 9 – конусовидная воронка

Рисунок 6 – Схема устройства для охлаждения ПЭД

Защитное устройство 7 содержит потокоотклоняющий элемент эллиптической формы, закрепленный на уровне отверстий входного модуля 2 УЭЦН 1. К данному элементу прикреплен обводной патрубок для исключения необходимости дополнительной герметизации питающего кабеля УЭЦН. Само устройство закреплено на корпусе ПЭД 4 и оснащено конусовидной воронкой 9, позволяющей предотвращать попадание отложений со стенок эксплуатационной колонны внутрь полости защитного устройства и УЭЦН во время спуско-подъемных операций (СПО). Кроме того, корпус данного устройства оснащен спиралевидными рёбрами жёсткости 8, обеспечивающими центровку на корпусе ПЭД, защиту УЭЦН при СПО и изменение траектории потока откачиваемой жидкости, охлаждающей ПЭД. При этом габаритные размеры корпуса, минимальный диаметр которого может составлять 125 мм, позволяет применять данное устройство в широком диапазоне типоразмеров УЭЦН и эксплуатационной колонны.

Принцип работы защитного устройства заключается в следующем. Во время эксплуатации скважины или на ВНР поток добываемой жидкости всегда попадает к электродвигателю через входное отверстие в нижней части защитного устройства, выполненной в виде усеченного конуса. Далее жидкость, двигаясь по спирали, охлаждает корпус электродвигателя и попадает во входной модуль

УЭЦН. Таким образом, всегда обеспечен процесс охлаждения электродвигателя потоком жидкости, равным производительности УЭЦН на текущем режиме.

Выполнено моделирование температурного режима ПЭД с помощью решения математических моделей, представленных в главе 2, и показано, что применение данного устройства обеспечивает снижение температуры двигателя в среднем на 10-15 $^{\circ}$ C, а в период пикового нагрева во время выноса жидкости глушения – на 20-22 $^{\circ}$ C (Рисунок 7).

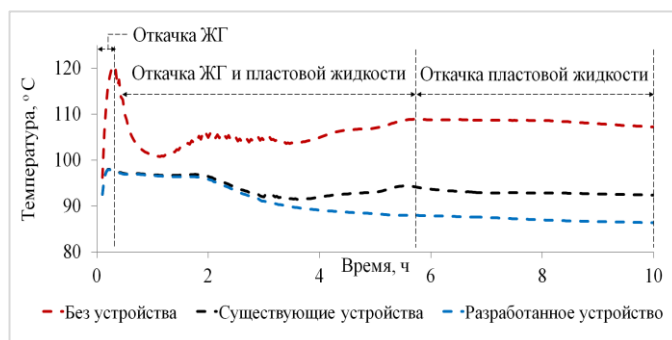


Рисунок 7 – Температура двигателя во время ВНР с устройством отклонителя потока и без него

В четвертой главе представлены результаты совершенствования системы мониторинга и регулирования УЭЦН при выводе скважины на стационарный режим работы, разработки и тестирования СППР. В данной главе также представлены результаты разработки лабораторного стенда, имитирующего работу системы «пласт-скважина-УЭЦН» и позволяющего осуществлять выбор оптимального режима работы УЭЦН на фоне варьирования значений притока жидкости и устьевого противодавления при использовании системы стабилизации уровня жидкости, а также учебно-методического пособия для повышения качества знаний, полученных студентами на лекциях.

Для обеспечения автоматизированного ввода в эксплуатацию УЭЦН разработана СППР, состоящая из комплексной математической модели «пласт-скважина-УЭЦН», реализованной в форме цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН, экспертных правил, интеллектуальных алгоритмов и баз данных, обеспечивающих моделирование и прогнозирование процесса ввода УЭЦН в эксплуатацию, а также поддержку принятия решений.

Система выполнена в виде программного обеспечения, пример интерфейса которого приведен на Рисунке 8.

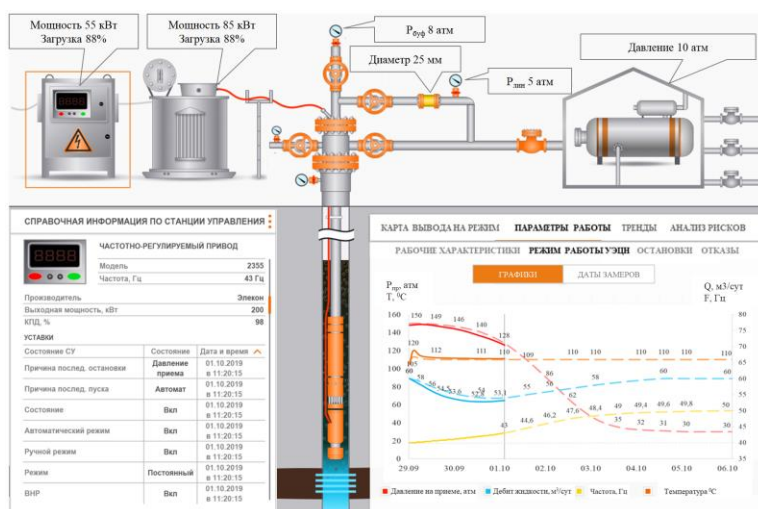


Рисунок 8 – Интерфейс разработанной системы поддержки принятия решений.

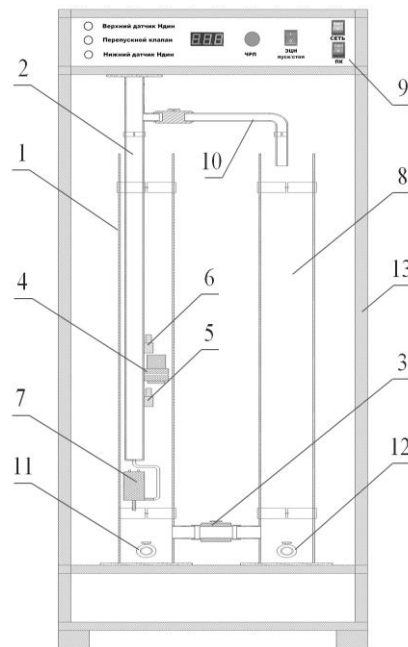
Для СППР реализовано 11 основных алгоритмов, обеспечивающих контроль и управление режимом работы УЭЦН: автоматическое определение негерметичности обратного клапана и НКТ; автоматическое определение минимально необходимой частоты тока при запуске УЭЦН; расчет режима работы УЭЦН, подбор целевой частоты тока УЭЦН, выбор режима (постоянный/периодический) и его параметров (циклы откачки/накопления); определение прямого/обратного направления вращения вала ПЭД; расчет расхода жидкости через насос; контроль исправности датчика температуры; определение интервала времени остановки ПЭД для охлаждения; диагностика и конфигурация уставок и защит станции управления УЭЦН; расчет допустимого времени работы ПЭД при кратковременном превышении номинального тока; контроль периодичности проведения замеров параметров работы УЭЦН.

На разработанную систему получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ. Внедрение данной системы позволит сократить время ВНР и сократить количество остановок и отказов УЭЦН.

Для совершенствования процесса ВНР скважины с УЭЦН предложены следующие оптимизационные мероприятия: установка перепускного устройства

для стабилизации динамического уровня жидкости и исключения необходимости постоянного его контроля; установка устройства для охлаждения ПЭД; реализация системы мониторинга и анализа замеров в автоматическом режиме; реализация алгоритмов автоматического определения причин отклонений и предложения мероприятий по их устранению; реализация алгоритмов анализа параметров работы скважины и уточнения режима работы. При этом потенциал сокращения длительности ВНР скважины с УЭЦН составит 44% .

Разработаны и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» лабораторный стенд (Рисунок 9) «Система стабилизации уровня жидкости» и учебно-методическое пособие «Выбор оптимального режима работы УЭЦН при использовании системы стабилизации уровня жидкости» для студентов, обучающихся по направлению подготовки: 21.03.01 «Нефтегазовое дело», профиль: «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов нефтегазового производства» при изучении дисциплины «Техника и технология добычи и подготовки нефти и газа».



1 – эксплуатационная колонна; 2 – НКТ; 3 – приточная линия; 4 – перепускной клапан; 5,6 – нижний/верхний датчик уровня жидкости; 7 – УЭЦН; 8 – емкость для жидкости; 9 – панель управления; 10 – сливная линия; 11,12 – сливной кран; 13 – корпус стенда

Рисунок 9 - Схема стенда «Система стабилизации уровня жидкости».

Для управления системой стабилизации уровня жидкости разработана программа ЭВМ, позволяющая минимизировать риски срыва подачи УЭЦН при ВНР или в процессе эксплуатации (на программу получено свидетельство о государственной регистрации). Данная программа включает в себя набор алгоритмов для мониторинга и управления ПЭД, подмодуль для контроля работы датчиков уровня жидкости, а также подмодуль для управления перепускным электроклапаном.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Установлено, что до 10 % выводов скважин с УЭЦН заканчиваются отказами глубинно-насосного оборудования или сопровождаются длительными остановками, связанными с восстановительными мероприятиями скважины, увеличивая среднюю длительность ВНР в 3 раза, до 17 суток. При этом основные причины неуспешности ВНР связаны с недостаточностью притока из пласта и наличием жидкости глушения в начальной стадии ВНР, которые приводят к срыву подачи УЭЦН и перегреву двигателя.

2 Разработана комплексная математическая модель системы «пласт-скважина-УЭЦН» для нестационарного режима работы скважины, реализованная в форме цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН. Данная модель описывает нестационарное течение пластового флюида в элементах системы и учитывает вынос жидкости глушения, изменение параметров работы УЭЦН и коэффициента продуктивности.

3 Разработана система для стабилизации уровня жидкости, включающая в себя автоматическую систему управления и систему определения динамического уровня, снабженную механизмом перепуска жидкости. Данное устройство позволит в автоматическом режиме управлять изменением динамического уровня в скважинах, подверженных частым изменениям режима работы по причине изменения притока, а также в скважинах, обратные клапаны которых подвержены ускоренному выходу из строя.

4 Разработано защитное устройство для обеспечения принудительного охлаждения ПЭД за счёт обтекания потоком жидкости по спирали. Данное

устройство позволит обеспечить процесс охлаждения ПЭД в скважинах с расположением УЭЦН в эксплуатационной колонне большого диаметра или ниже интервала перфорации, при ВНР на фоне изменения объема жидкости глушения, а также при эксплуатации скважин в периодическом режиме. А конструктивные особенности данного устройства позволят предотвращать попадание отложений со стенок эксплуатационной колонны внутрь полости устройства и УЭЦН при спуско-подъемных операциях, обеспечить центровку на корпусе ПЭД, а также применять данное устройство в широком диапазоне типоразмеров УЭЦН и эксплуатационной колонны. Результаты моделирования температурного режима погружного электродвигателя показали, что при использовании данного устройства температура двигателя может быть снижена в среднем на 10-15°С, а в период пикового нагрева во время выноса жидкости глушения – на 20-22°С.

5 Предложен новый алгоритм для автоматизированного ввода в эксплуатацию УЭЦН с помощью изменения режима работы насоса, за счет варьирования частоты таким образом, чтобы рабочая точка на расходно-напорной характеристике в разные моменты времени не выходила за границы рабочей области. Разработанный алгоритм позволяет снизить количество внеплановых остановок скважины из-за срывов подачи насоса и перегрева ПЭД вследствие снижения продуктивности пласта и замещения жидкости глушения пластовым флюидом более чем в 2 раза.

6 Для обеспечения автоматизированного ввода в эксплуатацию УЭЦН разработана система поддержки принятия решений, состоящая из комплексной математической модели «пласт-скважина-УЭЦН», реализованной в форме цифрового двойника процесса функционирования скважины с УЭЦН, деревьев принятия решений, экспертных правил (более 100 видов рекомендаций по изменению режимов работы УЭЦН и проведению оперативных мероприятий), интеллектуальных алгоритмов и базы данных. Внедрение данной системы позволит прогнозировать и оптимизировать режим работы УЭЦН при ВНР.

7 Разработаны и внедрены в учебный процесс лабораторный стенд и учебно-методическое пособие, позволяющие проводить исследования изменения

динамического уровня жидкости в моделируемой скважине при варьировании расходно-напорных характеристик УЭЦН и изменения коэффициента продуктивности. Результаты лабораторных исследований подтвердили работоспособность системы стабилизации динамического уровня жидкости в стволе скважины, определены границы применимости устройства.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих трудах:

- в материалах, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки и науки РФ:

1 Архипов, Д.С. Пути повышения энергоэффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти с применением цифровых двойников / Д.С. Архипов, Б.М. Латыпов, Д.В. Сильнов, Р.М. Еникеев, А.В. Пензин, Л.В. Валиахметов // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19. – №.1. – С. 42–50.

2 Уразаков, К.Р. Система стабилизации динамического уровня жидкости в скважине, оборудованной установкой электроцентробежного насоса / К.Р. Уразаков, Д.В. Сильнов // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 1. – С. 114-123.

3 Сильнов, Д.В. Защитное устройство для погружной установки электроприводного центробежного насоса / Д.В. Сильнов, К.Р. Уразаков, Б.М. Латыпов // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 1. – С. 143-149.

- в патентах и свидетельствах о регистрации ЭВМ:

4 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611372 Российская Федерация. Оперативные мероприятия : № 2021610237 : заявл. 11.01.2021 : опубл. 26.01.2021 / Э.О. Тимашев, А.В. Катермин, А.А. Палагута [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Акционерная нефтяная Компания «Башнефть» (ПАО АНК «Башнефть»).

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611658 Российская Федерация. Интеллектуальный вывод скважин на режим: № 2021610083: заявл. 11.01.2021 : опубл. 02.02.2021 / А.А. Пашали, А.В. Катермин, А.А. Палагута [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Акционерная нефтяная Компания «Башнефть» (ПАО АНК «Башнефть»).

6 Пат. 2770776 Российская Федерация, МПК F04D 15/02. Устройство для стабилизации давления на приеме электроцентробежного насоса / К.Р. Уразаков, П.М. Тугунов, Д.В. Сильнов, Б.М. Латыпов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». - № 2021110203; заявл. 12.04.2021; опубл. 21.04.2022, Бюл. № 12. –15 с.: ил.

7 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613526 Российская Федерация. Программа ЭВМ для управления системой стабилизации уровня жидкости в скважине с УЭЦН : № 2022612816 : заявл. 28.02.2022 : опубл. 14.03.2022 / Д.В. Сильнов, Б.М. Латыпов, В.В. Семенов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

- в материалах российских и международных конференций:

8 Сильнов, Д.В. Способы защиты технологического оборудования от солеотложения при разработке месторождений в условиях Крайнего севера Западной Сибири / Д.В. Сильнов, А.В. Сиднев // Наука и образование в современной России - 2010: сборник трудов международной научной конференции «Наука и образование в современной России». Международный журнал экспериментального образования. – 2011. – №. 3. – С. 160–161.

9 Сильнов, Д.В. Цифровой двойник скважины для обеспечения вывода ее на режим / Д.В. Сильнов // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2021: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – 170–172 с.

10 Сильнов, Д.В. Применение цифровых двойников установок электроцентробежных насосов добычи нефти для управления их энергоэффективностью / Д.В. Сильнов, Д.С. Архипов, В.В. Семенов // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации: сборник трудов второй всероссийской научно-технической конференции. – Белебей: СамГТУ, 2021. – 10–12 с.

11 Пашали, А.А. Оптимизация периодического режима работы скважин, эксплуатируемых установками электроцентробежных насосов в ПАО «НК «Роснефть» / А.А. Пашали, Д.В. Сильнов, Б.М. Латыпов // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2021: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – 148–150 с.

12 Сильнов, Д.В. Комплексный подход с применением интеллектуальных алгоритмов и цифровых двойников при выводе на режим скважин с УЭЦН / Д.В. Сильнов // Наука. Исследования. Практика: сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2021. – 73–74 с.

13 Сильнов, Д.В. Устройство для охлаждения погружного электродвигателя установки электроприводного центробежного насоса / Д.В. Сильнов, Б.М. Латыпов // Наука. Исследования. Практика: сборник избранных статей по материалам Всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения» (Санкт-Петербург, Март 2022). – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2022. – 96 с.

14 Сильнов, Д.В. Влияние жидкости глушения на работу электроцентробежного насоса во время вывода скважины на режим / Д.В. Сильнов, А.С. Топольников, К.Р. Уразаков // Ежегодная Международная научно-практическая конференция "БУЛАТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ", 2022. – № 2. – С. 176–180.

- в учебно-методических пособиях:

15 Сильнов, Д.В. Выбор оптимального режима работы УЭЦН при использовании системы стабилизации уровня жидкости: учебно-методическое пособие / Д.В. Сильнов, Б.М. Латыпов, В.В. Семенов, А.Р. Гибадуллин, А.С. Топольников. – Уфа: УГНТУ, 2022.- 15 с.

- в других изданиях:

16 Сильнов, Д.В. К вопросу о солеобразовании в процессе добычи нефти на севере Западной Сибири / Д.В. Сильнов, А.В. Сиднев // Успехи современного естествознания. Москва : РАЕН. – 2011. – № 3. – С. 46–48.

17 Сильнов, Д.В. Способы защиты технологического оборудования от солеотложения при разработке месторождений в условиях Крайнего севера Западной Сибири / Д.В. Сильнов, А.В. Сиднев // Международный журнал экспериментального образования. – 2011. – № 3. – С. 160–161.

18 Пашали, А.А. Цифровой двойник скважины как инструмент цифровизации вывода скважин на режим в ПАО АНК «Башнефть» / А.А. Пашали, А.В. Колонских, Р.С. Халфин, Д.В. Сильнов, А.С. Топольников, Б.М. Латыпов, К.Р. Уразаков, А.В. Катермин, А.А. Палагута, Р.М. Еникеев // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 80–85.

19 Пашали, А.А. Об оптимизации периодического режима эксплуатации скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов в ПАО «НК «Роснефть» / А.А. Пашали, Р.С. Халфин, Д.В. Сильнов, А.С. Топольников, Б.М. Латыпов // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 4. – С. 92-96.

20 Пашали, А.А. Вывод на режим скважин, эксплуатируемых установками электроцентробежных и штанговых насосов, с применением методов машинного обучения и цифровых двойников / А.А. Пашали, Д.В. Сильнов, А.С. Топольников, Б.М. Латыпов, Р.М. Еникеев, С.С. Шубин // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 112–117.