

На правах рукописи



РУКИН МИХАИЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПОТОКООТКЛОНЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
УСТАНОВКИ СКВАЖИННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ЛОПАСТНОГО
НАСОСА**

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на кафедре нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Нижневартовский государственный университет».

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Тимашев Эдуард Олегович
Официальные оппоненты:	Дроздов Александр Николаевич доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» / кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений», профессор Пазяк Андрей Александрович кандидат технических наук ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» / кафедра «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», заведующий кафедрой
Ведущая организация	Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти публичного акционерного общества «Татнефть» имени В.Д. Шашина (г. Альметьевск)

Защита состоится «29» мая 2026 года в 12.00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <https://rusoil.net/>.

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день установки (скважинных) электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) занимают лидирующую позицию среди всех видов механизированной эксплуатации по суммарному объему добываемой в Российской Федерации нефти. Вместе с тем, одной из значимых тенденций развития нефтегазового сектора в РФ является снижение темпов разработки нефтяных месторождений и объемов добычи углеводородных ресурсов. Это предопределило активный рост числа скважин, эксплуатируемых УЭЛН в периодическом режиме, в частности, в периодическом кратковременном режиме (ПКР). Данный метод подразумевает циклическое чередование периодов откачки (насос включен) и периодов накопления жидкости (насос выключен), что позволяет эффективно использовать стандартное насосное оборудование в условиях недостаточного притока пластовой жидкости.

Наряду с преимуществами, периодический режим эксплуатации УЭЛН сопряжен с рядом недостатков, таких как частые пуски и остановки оборудования, приводящие к повышенным пусковым токам, увеличению нагрузки на механические и электрические узлы. Остановки насоса также способствуют отложению механических примесей и образованию отложений АСПО, что может снижать эффективность работы и наработку до отказа (НдО) УЭЛН. Несмотря на указанные недостатки, применение периодического режима остается экономически целесообразным, особенно для скважин с низким дебитом, где поддержание непрерывной работы УЭЛН неэффективно или невозможно.

Одним из значимых осложняющих факторов при эксплуатации УЭЛН в ПКР является низкая скорость потока в обсадной колонне, омывающего погружной электродвигатель (ПЭД). Это приводит к недостаточному отводу тепла и, как следствие, к перегреву ПЭД и других узлов УЭЛН. В этой связи актуальным является решение вопросов, связанных с обеспечением надежности и эффективности работы УЭЛН в периодическом кратковременном режиме работы с учетом оптимизации теплового режима ПЭД.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы эксплуатации УЭЛН в периодическом режиме рассматривались в работах Ведерникова Ю.А., Виденеева А.С., Гука В.Ю., Дроздова А.Н., Ивановского В.Н., Конопки Д.В., Кузьмичева Н.П., Листрицкого В.М., Лихачёвой Е.А., Мальцева Н.В., Мищенко И.Т., Островского В.Г., Сильнова Д.В., Топольникова А.С., Юдина Е.В. и других исследователей. Авторами обоснованы критерии перевода скважин в периодический режим, рассмотрены различные типы периодической эксплуатации УЭЛН, а также затронуты вопросы подбора насосного оборудования и режима работы скважин с учетом осложняющих факторов. Отмечается, что эффективность и надежность УЭЛН во многом определяется тепловым режимом ПЭД и ЭЛН.

Вопросам расчета и прогнозирования теплового режима ПЭД, применению численного моделирования для расчета тепловых процессов в скважине при работе УЭЛН посвящены работы Гизатуллина Р. Р., Москвиной Е.Ю., Мельниченко В.Е., Пивня В.В., Купцова С.М., Нугаева И.Ф., Байгускарова И.С., Стыскина А.В., Уразбахтиной Н.Г., Конюхова В.М., Конюхова И.В., Чекалина А.Н., Валиуллина Р.А., Рамазанова А.Ш., Волкова М.Г., Зейгмана Ю.В., Язькова А.В. В существующих работах детально изучены тепловые процессы в ПЭД применительно к стационарным режимам работы УЭЛН, что позволяет прогнозировать и предупреждать возможный перегрев ПЭД в процессе вывода скважины на режим и при дальнейшей непрерывной эксплуатации. Однако для периодических режимов работы УЭЛН, особенно в ПКР, вопросы нестационарных тепловых процессов остаются практически нерешенными. Особенностью данного режима является циклический характер работы ПЭД и ЭЛН, что требует разработки новых подходов к моделированию и оптимизации теплового режима для обеспечения надежной и эффективной работы УЭЛН.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки). В частности, разработка и исследование теплового режима

ПЭД для УЭЛН с потокоотклоняющим устройством направлены на расширение функциональности УЭЛН, позволяя эффективно эксплуатировать их в сложных условиях периодического режима, что соответствует п.2: «Разработка и исследование технологических процессов механизации производства в соответствии с современными и перспективными требованиями, технологиями, показателями качества и надежности, промышленной и экологической безопасности». Тепловой режим ПЭД напрямую влияет на надежность и эффективность работы УЭЛН в конкретных условиях периодического режима. Исследование направлено на оптимизацию работы агрегата в этих условиях, что соответствует п.7 паспорта специальности: «Исследование с учетом эксплуатационных условий технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой». Разработка эмпирических зависимостей для предиктивной оценки наработки до отказа (НдО) УЭЛН напрямую соответствует п.8: «Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации». Разработанные модели позволяют прогнозировать ресурс оборудования и оптимизировать графики технического обслуживания.

Цель работы

Разработка и обоснование применения потокоотклоняющего устройства для интенсификации охлаждения погружного электродвигателя установки скважинного электроприводного лопастного насоса и повышения надежности оборудования при работе в периодическом кратковременном режиме.

Задачи исследования

1 Комплексный анализ данных об эксплуатации УЭЛН в ПКР на месторождениях Западной Сибири с целью выявления, количественной оценки и ранжирования влияния различных факторов на наработку до отказа (НдО) и разработки методов предиктивной оценки ресурса оборудования.

2 Разработка потокоотклоняющего устройства для интенсифицированного охлаждения ПЭД при работе в ПКР.

3 Разработка и верификация математической модели для расчета температуры в системе «погружной электродвигатель - скважинный флюид» при эксплуатации скважины УЭЛН в ПКР, учитывающей нестационарный циклический характер работы УЭЛН и влияние потокоотклоняющего устройства на теплоотвод от ПЭД.

4 Моделирование и исследование влияния конструктивных параметров потокоотклоняющего устройства (диаметр корпуса, исполнение внутренней поверхности) на тепловой режим погружного двигателя, обоснование эффективности устройства с точки зрения снижения температуры ПЭД.

Научная новизна

1 Установлена закономерность формирования теплового режима ПЭД в ПКР, заключающаяся в асимметрии скоростей нагрева и охлаждения двигателя: скорость роста температуры в полуцикле откачки превышает скорость ее снижения в полуцикле накопления, что приводит к росту температуры ПЭД при увеличении длительности цикла (нагрев возрастает до 30% при увеличении периода откачки с 5 до 10 минут).

2 Установлено, что применение потокоотклоняющего устройства интенсифицирует теплообмен с ПЭД при работе в ПКР за счет принудительного перенаправления потока из затрубного пространства, что выражается в росте чисел Рейнольдса и Нуссельта в 3-5 раз и обеспечивает снижение нагрева двигателя в 2-3 раза (на 20-40 °С). Выявлено, что использование пластин оребрения на внутренней поверхности потокоотклоняющего устройства за счет снижения проходного сечения, увеличения площади теплового контакта и интенсификации турбулентности потока позволяет снизить температуру ПЭД еще на 20%. В результате снижаются риски преждевременных отказов ПЭД, связанных с перегревом, что позволяет увеличить его ресурс.

3 Для условий периодического кратковременного режима (ПКР) на основе статистического анализа промысловых данных впервые выявлены,

количественно оценены и проранжированы по степени влияния ключевые факторы, определяющие наработку до отказа (НдО), что позволило установить их комплексное влияние: доминирующее отрицательное (газовый фактор и концентрация мехпримесей с коэффициентом корреляции 0,6-0,8), значительное положительное (плотность нефти и давление насыщения с коэффициентом корреляции 0,4-0,6) и умеренное положительное (длительность периода откачки и дебит скважины с коэффициентом корреляции $\sim 0,3$).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о тепловых процессах и надежности УЭЛН в условиях ПКР. Установленные закономерности, в частности асимметрия скоростей нагрева и охлаждения ПЭД в зависимости от длительности циклов, углубляют понимание нестационарного теплообмена и обосновывают необходимость применения динамических моделей для анализа теплового состояния оборудования. Установлены закономерности влияния потокоотклоняющего устройства и его конструктивных параметров (внутреннего диаметра корпуса, площади поперечного сечения пластин оребрения), параметров рабочего режима УЭЛН (длительности периодов откачки и накопления, мощности тепловыделения в ПЭД), свойств перекачиваемой жидкости (газового фактора, обводненности) на тепловое поле ПЭД и омывающей его жидкости при эксплуатации УЭЛН в ПКР. Теоретически обоснована эффективность применения потокоотклоняющего устройства для интенсификации теплоотвода и снижения температуры ПЭД, что подтверждено как результатами численного моделирования, так и результатами опытно-промысловых исследований.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- 1 Эффективность разработанного потокоотклоняющего устройства для интенсификации теплоотвода от ПЭД УЭЛН при работе в ПКР (патент РФ на изобретение № 2830533) подтверждена результатами опытно-промысловых исследований (ОПИ) на добывающей скважине АО «Газпромнефть - ННГ»,

работающей в ПКР. ОПИ показали снижение максимальной температуры ПЭД УЭЛН на величину около 13°C по сравнению с эксплуатацией без устройства.

2 Разработан и внедрен в производственный процесс АО «НЕГУСНЕФТЬ» Стандарт «Методика расчета теплового режима погружного электродвигателя установки электроприводного центробежного насоса в периодическом режиме эксплуатации». Стандарт используется при расчете и подборе к условиям эксплуатации УЭЛН в ПКР.

3 Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУВО «Нижневартовский государственный университет» при подготовке магистров, обучающихся по направлению 21.04.01 Нефтегазовое дело профиля «Управление технологическими процессами эксплуатации и ремонта скважин».

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационного исследования использовались: статистические методы анализа данных, известные положения теоретической механики, термо- и гидродинамики, методы математического моделирования физических процессов, основанные на фундаментальных законах сохранения массы, импульса, уравнении теплового баланса, методы математического анализа, численные методы решения нелинейных уравнений.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты статистического анализа промысловых данных, позволившие выявить и количественно оценить ключевые факторы, определяющие наработку до отказа (НдО) УЭЛН в ПКР (газовый фактор, концентрация мехпримесей, плотность нефти, давление насыщения, длительность периода откачки, дебит скважины по жидкости), и получить эмпирические зависимости для предиктивной оценки НдО с множественным коэффициентом корреляции более 0,8, учитывающие влияние этих факторов.

2 Математическая модель нестационарного теплообмена в системе «ПЭД – скважинный флюид» при работе УЭЛН в ПКР и установленные с использованием модели закономерности влияния параметров рабочего режима

УЭЛН и свойств перекачиваемой жидкости на тепловое поле ПЭД, позволяющие прогнозировать тепловой режим ПЭД и оптимизировать режимы работы УЭЛН.

3 Результаты численного моделирования и обоснования применения потокоотклоняющего устройства (патент РФ на изобретение № 2830533) при эксплуатации УЭЛН в ПКР с точки зрения оптимизации теплового режима ПЭД, включая закономерности влияния конструктивных параметров потокоотклоняющего устройства (внутреннего диаметра корпуса, площади поперечного сечения пластин оребрения) на температуру ПЭД.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанной математической модели, её адекватностью, использованием известных положений фундаментальных наук, согласованностью полученных теоретических результатов с известными положениями теории насосов, а также с промысловыми данными.

Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях: Международной научно-практической конференции «Цифровые технологии в образовании и практической деятельности» (Уфа, 2022), VIII Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 2023), Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле» (Уфа, 2024), XI Международной научно-практической конференции «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы» (Нижневартовск, 2024), Международной научно-технической конференции, посвященная памяти профессора В.Х. Хамаева «Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук» (Уфа, 2024).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 2 статьи в журналах, включенных в ядро РИНЦ. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка источников из 104 наименований. Работа содержит 149 страниц, 41 рисунок, 2 таблицы, 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой** главе проведен анализ причин и факторов, влияющих на надежность УЭЛН в ПКР на примере месторождений Западной Сибири. Для анализа использована выборка данных о работе порядка 500 добывающих скважин, оборудованных УЭЛН и эксплуатируемых в ПКР, в период с 2015 по 2024 г.

На Рисунке 1 представлена структура отказов УЭЛН, демонстрирующая, что наиболее распространенными причинами являются: снижение сопротивления изоляции (42%), прекращение подачи (35%) и отсутствие циркуляции (15%).

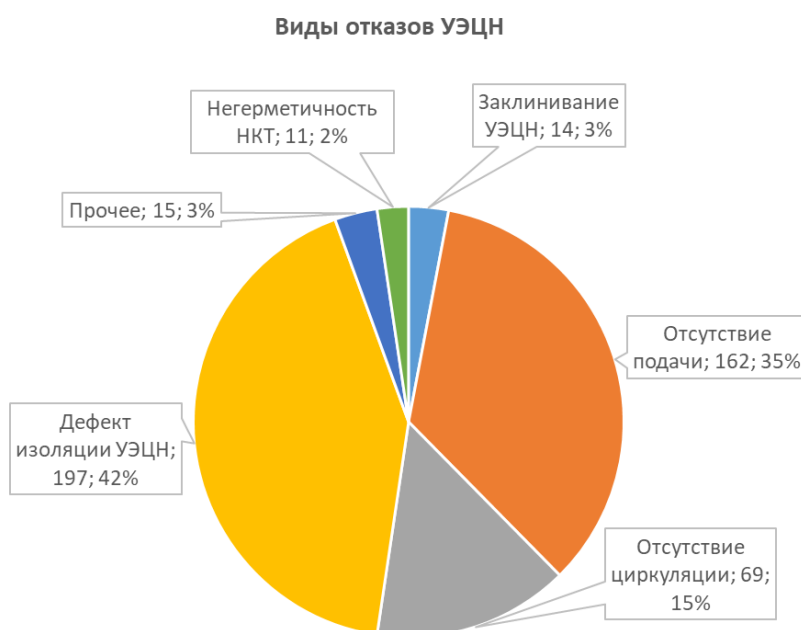


Рисунок 1 – Виды отказов УЭЛН, их количество, процентное соотношение

Анализ динамики отказов показал, что периодический характер эксплуатации, включающий частые запуски УЭЛН (в среднем по выборке 65 запусков в сутки), приводит к повышенным нагрузкам на электрические узлы, питающий кабель и погружной электродвигатель (ПЭД). В условиях низкого притока жидкости из пласта (средний дебит по выборке $28 \text{ м}^3/\text{сут}$) и прекращения движения жидкости в верхней части скважины в период накопления происходит интенсификация отложений механических примесей (концентрация в отдельных скважинах достигает 8000 мг/л) и АСПО, что негативно сказывается на работе насосного оборудования.

Для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на НдО УЭЛН, был применен корреляционный анализ по критерию Спирмена. На основе анализа с использованием шкалы Чеддока определены параметры с наибольшим влиянием на НдО, которое характеризуется коэффициентом корреляции r , причем положительное значение r указывает на увеличение НдО с ростом параметра, а отрицательное значение свидетельствует об уменьшении НдО при увеличении значения параметра. Параметры с высоким и заметным влиянием: газовый фактор пластовой нефти ($r = -0,79$), концентрация механических примесей ($r = -0,61$), плотность нефти в пластовых условиях ($r = 0,56$); параметры с умеренным влиянием: дебит скважины по жидкости ($r = 0,30$), длительность периода откачки ($r = 0,29$), внутренний диаметр обсадной колонны ($r = -0,21$). Описан механизм влияния указанных параметров на величину НдО. Увеличение газового фактора и давления насыщения способствуют сокращению НдО вследствие увеличения содержания газа в скважинной продукции, что приводит к интенсификации кавитационных процессов в ЭЛН, ухудшению теплоотвода от ПЭД и ЭЛН вследствие низкой теплопроводности и теплоемкости газонасыщенной жидкости. Снижение плотности нефти приводит к снижению НдО, поскольку уменьшение плотности сопровождается снижением вязкости и увеличением газового фактора, что в совокупности ухудшает смазывающие свойства и увеличивает газонасыщенность скважинной продукции, негативно влияя на работу УЭЛН. Увеличение концентрации механических примесей снижает НдО из-за

абразивного износа рабочих органов насоса; увеличение дебита скважин по жидкости, снижение диаметра обсадной колонны способствуют увеличению НдО благодаря увеличению скорости потока и улучшению теплоотвода от ПЭД; увеличение длительности периода откачки способствует росту НдО вследствие снижения частоты пусков-остановок скважины.

На основе регрессионного анализа получены эмпирические зависимости для оценки НдО УЭЛН, учитывающие влияние вышеуказанных факторов

$$с\ r > 0,4: N = 1,56\rho_n - 0,22ГФ + 0,3P_{нас} - 0,29n_{мех.пр} - 1012,8, \quad (1)$$

$$с\ r > 0,2: N = 1,41\rho_n - 0,22ГФ + 0,28P_{нас} - 0,27n_{мех.пр} + 0,35Q_{ж} - \\ - 0,29t_{от} - 0,34D_{об} - 844,8, \quad (2)$$

где $ГФ$ – газовый фактор пластовой нефти, $м^3/м^3$;

$P_{нас}$ – давление насыщения, Па;

$n_{мех.пр}$ – концентрация механических примесей, г/л;

ρ_n – плотность нефти в пластовых условиях, $кг/м^3$;

$Q_{ж}$ – дебит жидкости, $м^3/сут$;

$t_{от}$ – период откачки, мин;

$D_{об}$ – внутренний диаметр обсадной колонны, мм.

Множественный коэффициент корреляции уравнений (1) и (2) для определения наработки на отказ УЭЛН составил порядка $r^* = 0,8$.

В главе 2 представлена математическая модель для расчета температурного поля ПЭД и омывающей его жидкости в режиме кратковременной периодической откачки. В отличие от известных подходов, разработанная модель детально учитывает нестационарные тепловые и гидродинамические процессы, возникающие при периодическом кратковременном режиме работы УЭЛН, что позволяет более точно прогнозировать температуру ПЭД. Модель базируется на численном решении уравнения теплопроводности в ПЭД с учетом теплового источника

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q(t)$$

$$q(t) = \frac{P(t)(1-\eta)}{\pi R^2 L}, \quad (3)$$

где T – температура ПЭД, К;

r – радиальная координата;

t – время, с;

ρ – эффективная плотность, кг/м³;

c – удельная теплоемкость ПЭД, Дж/(кг·К);

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

R – внешний радиус ПЭД, м;

L – длина ПЭД, м;

$q(t)$ – переменная во времени удельная мощность тепловыделения в ПЭД;

$P(t)$, η – переменная мощность и КПД ПЭД соответственно (равны нулю в полупериоде накопления).

Начальные и граничные условия: температура ПЭД в момент времени $t = 0$ равна температуре обтекающей (омывающей) жидкости T_0 ; на границе симметрии $r = 0$ записано условие отсутствия теплового потока, на внешней границе учтен тепловой поток между стенкой ПЭД и омывающей жидкостью

$$T|_{t=0} = T_0$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

$$\left. \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_f - T_w) \quad (4)$$

где $T_w = T|_{r=R}$.

Уравнение конвективного теплообмена для многофазного флюида, омывающего ПЭД, записывается в виде:

$$\left(\rho_l c_l \alpha_l + \rho_g c_g \alpha_g\right) \frac{\partial T_f}{\partial t} + \left(\rho_l c_l \alpha_l u_l + \rho_g c_g \alpha_g u_g\right) \frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{h(T_w - T_f)}{S} + \frac{h_c(T_g - T_f)}{S}, \quad (5)$$

где T_w – температура наружной стенки ПЭД, К;

T_f – температура флюида, К;

T_g – геотермическая температура на глубине ПЭД, °С;

ρ_l – плотность жидкости, кг/м³;

c_l – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);

ρ_g – плотность газа, кг/м³;

c_g – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);

α_l, α_g – объемная доля жидкости и газа соответственно;

S – площадь поперечного сечения потока, м²;

u_f, u_g – соответственно скорость жидкостной и газовой фаз, обтекающих ПЭД, м/с;

R_c – внутренний радиус обсадной колонны, м;

h – коэффициент теплообмена между флюидом и ПЭД, Вт/(м²·К);

h_c – коэффициент теплообмена между флюидом и окружающей внешней средой (колонной, цементным кольцом и горными породами), Вт/(м²·К);

индекс l соответствует жидкости, индекс g – газу.

Для дискретизации исходной системы уравнений используется метод контрольных объемов. Одномерные уравнения по r для расчета температуры ПЭД решаются методом прогонки, уравнение теплопереноса в жидкости решается маршевым алгоритмом, сопряжение системы ПЭД-флюид проводится итеративно.

Моделирование теплового режима погружного электродвигателя в процессе периодического режима работы проводится при следующих значениях параметров: типоразмер ПЭД 1ВЭДБТ45-117, мощность ПЭД 45 кВт, КПД двигателя 90%, внешний диаметр ПЭД 117 мм, длина ПЭД 3 м, длительности периодов откачки и накопления 5 и 10 мин соответственно, подача насоса в установившемся режиме откачки 90 м³/сут, дебит установившегося режима

30 м³/сут, начальная температура пластовой жидкости, обтекающей ПЭД, 80 °С, обводненность жидкости 80%, внутренний диаметр обсадной колонны 130 мм. Динамика температуры ПЭД (максимальной в центре ПЭД) и обтекающей жидкости (на выходе из области ПЭД) после пуска скважины и в процессе периодической эксплуатации представлена на Рисунке 2.

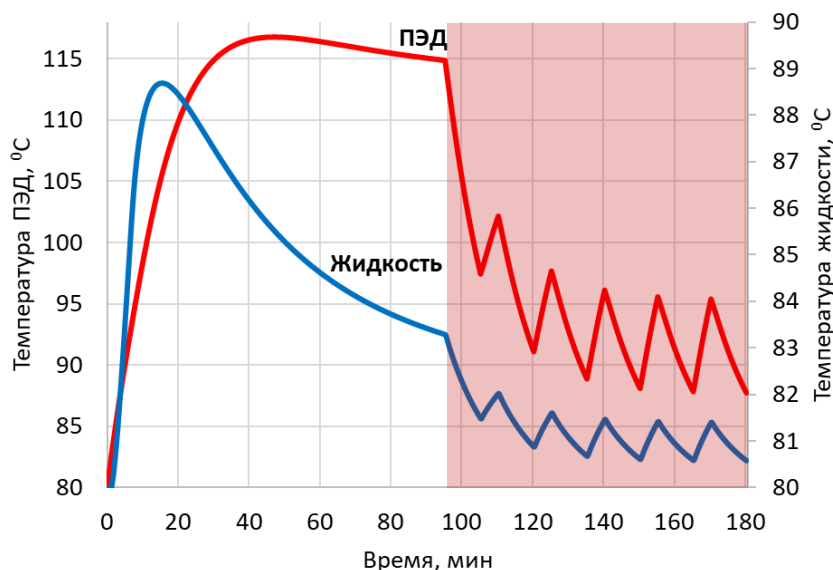


Рисунок 2 – Динамика температуры ПЭД и обтекающей жидкости (цветом выделена работа ПЭД в ПКР)

В процессе вывода скважины на режим температура ПЭД и жидкости достигает максимальных значений (116,8 °С и 88,7 °С соответственно). При дальнейшей эксплуатации в ПКР наблюдается существенное снижение температуры: максимальная температура ПЭД в конце полуцикла откачки составляет около 95,1 °С, температура обтекающей ПЭД жидкости не превышает 81,4 °С. Таким образом, переход к ПКР обеспечивает снижение нагрева ПЭД на величину около 20 °С по сравнению с периодом вывода на режим. Исследована чувствительность параметров режима откачки на тепловой режим ПЭД.

Влияние длительности периодов откачки и накопления на температуру ПЭД и жидкости (после вывода скважины на режим) показано на Рисунке 3. Рассмотрены длительности откачки 5, 10, 15 минут, при этом длительность

периода накопления подбиралась исходя из условия обеспечения требуемого дебита скважины 30 м³/сут при подаче насоса в этом режиме 90 м³/сут.

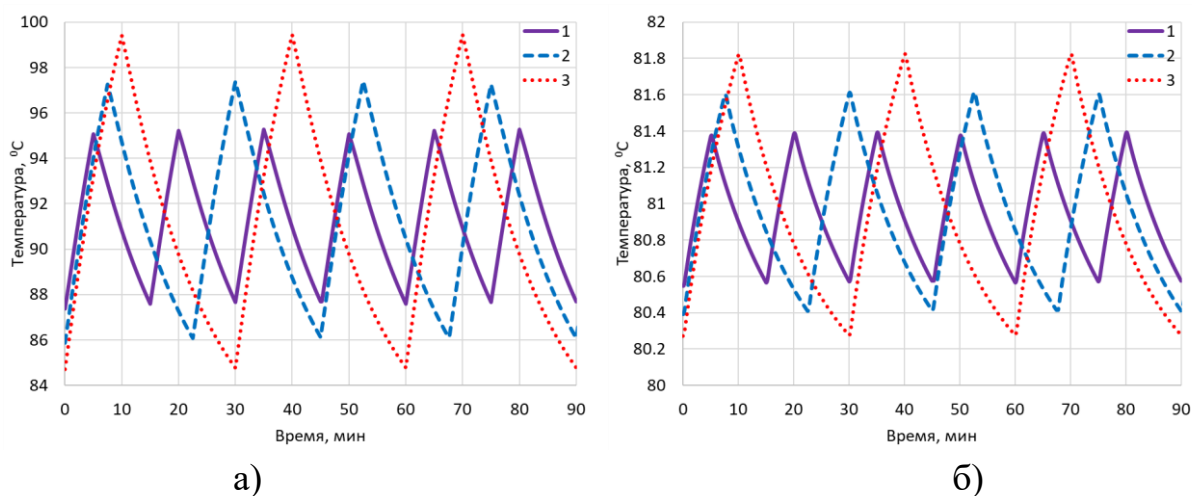


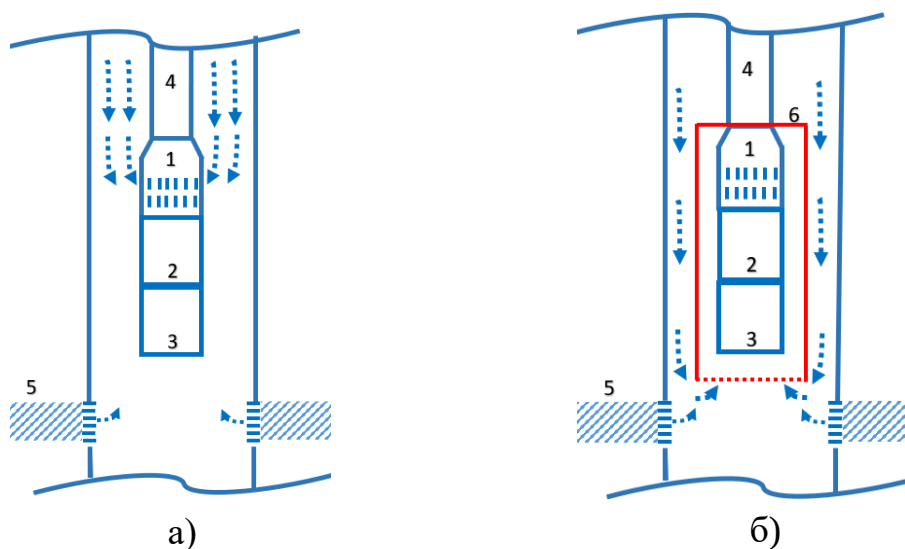
Рисунок 3 – Влияние длительности периода откачки и накопления на температуру ПЭД (а) и обтекающей жидкости (б) (1 – период откачки $t_1 = 5$ мин, накопления $t_2 = 10$ мин; 2 – $t_1 = 7,5$ мин, $t_2 = 15$ мин; 3 – $t_1 = 10$ мин, $t_2 = 20$ мин)

С увеличением длительности периода откачки температура ПЭД и жидкости возрастает (например, при увеличении с 5 до 10 мин нагрев ПЭД увеличивается на 29%). Оптимизация длительности периодов откачки и накопления в ПКР требует выбора максимально возможной длительности откачки, способствующей снижению частоты пусков-остановок УЭЛН, увеличению НдО, при условии поддержания температуры ПЭД в пределах допустимых значений. Выбор конкретного режима должен учитывать технические возможности станции управления, геолого-технические условия скважины и характеристики пласта.

Исследовано также влияние газового фактора и обводненности продукции на тепловой режим ПЭД при эксплуатации УЭЛН в ПКР. В частности, установлено, что увеличение газового фактора с 25 до 100 м³/м³ приводит к повышению температуры ПЭД до 11%. Снижение обводненности с 0,8 до 0,2 может увеличить нагрев ПЭД до 51%. Это обусловлено снижением

теплопроводности жидкости и увеличением объемной доли газа в потоке, что ухудшает теплоотвод от ПЭД.

В главе 3 исследовано применение потокоотклоняющего устройства, обеспечивающего повышение надежности УЭЛН за счёт обеспечения охлаждения ПЭД потоком жидкости, откачиваемой из затрубного пространства скважины. В полупериоде откачки при максимальном режиме загрузки ПЭД подача УЭЛН значительно превышает приток пластовой жидкости в скважину, в этой связи большая часть жидкости откачивается из затрубного пространства скважины, не обтекая погружной двигатель. Применение потокоотклоняющего устройства (ПУ) позволяет интенсифицировать отвод тепла от ПЭД в полупериоде откачки и значительно снизить риски перегрева узлов погружного двигателя и других узлов УЭЛН (Рисунок 4).



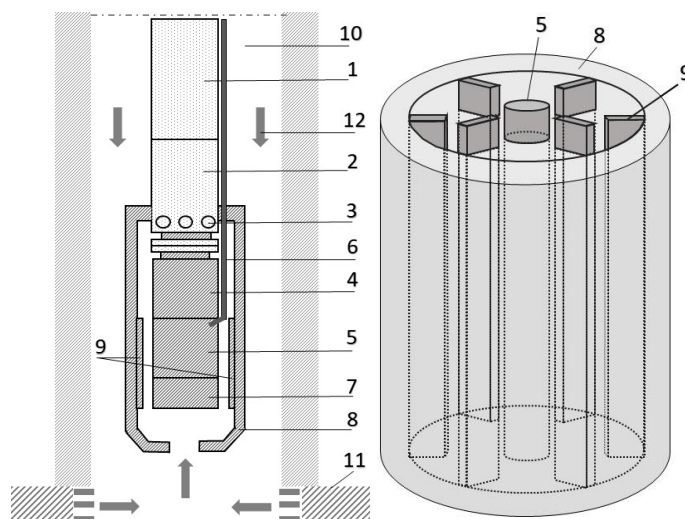
а – УЭЛН без ПУ; б – УЭЛН с ПУ

1 – ЭЛН; 2 – гидрозащита; 3 – ПЭД; 4 – насосно-компрессорные трубы (НКТ);
5 – продуктивный пласт, 6 – ПУ

Рисунок 4 – Схема потоков в скважине в полупериоде откачки

Разработано защитное охлаждающее устройство для улучшения теплового режима ПЭД УЭЛН в ПКР (патент РФ на изобретение 2830533). Внутренняя поверхность защитного охлаждающего устройства выполнена с вертикальными

прямоугольными пластинами оребрения, равномерно распределенными по периметру внутренней поверхности корпуса устройства с образованием во внутренней полости устройства канала с возможностью свободного подъема восходящего потока жидкости (Рисунок 5).



- 1 - электроприводной лопастной насос; 2 - входной модуль насоса; 3 - приемные отверстия;
 4 - гидрозашита; 5 - погружной электродвигатель; 6 - погружной кабель;
 7 - термоманометрическая система; 8 - защитное охлаждающее устройство;
 9 - прямоугольные пластины оребрения; 10 - затрубное пространство; 11 - пласт;
 12 - флюид из затрубного пространства

Рисунок 5 – Принципиальная схема (слева) и общий вид (справа) защитного охлаждающего устройства

Наличие пластин оребрения приводит к снижению площади проходного сечения восходящего потока жидкости и росту скорости потока, также благодаря наличию пластин оребрения значительно возрастает поверхность теплового контакта восходящего потока жидкости и корпуса защитного охлаждающего устройства, вследствие чего жидкость более эффективно передает тепло корпусу устройства.

Исследован тепловой режим погружного электродвигателя УЭЛН с ПУ в периодическом кратковременном режиме работы. Расчеты выполнены на основе представленной в главе 2 математической модели, описывающей теплообмен

погружного двигателя и обтекающего его флюида, но с учетом наличия ПУ (учтены встречные потоки снаружи и внутри ПУ) Динамика температуры погружного двигателя и омывающей его жидкости во времени при наличии и отсутствии ПУ показана на Рисунке 6.

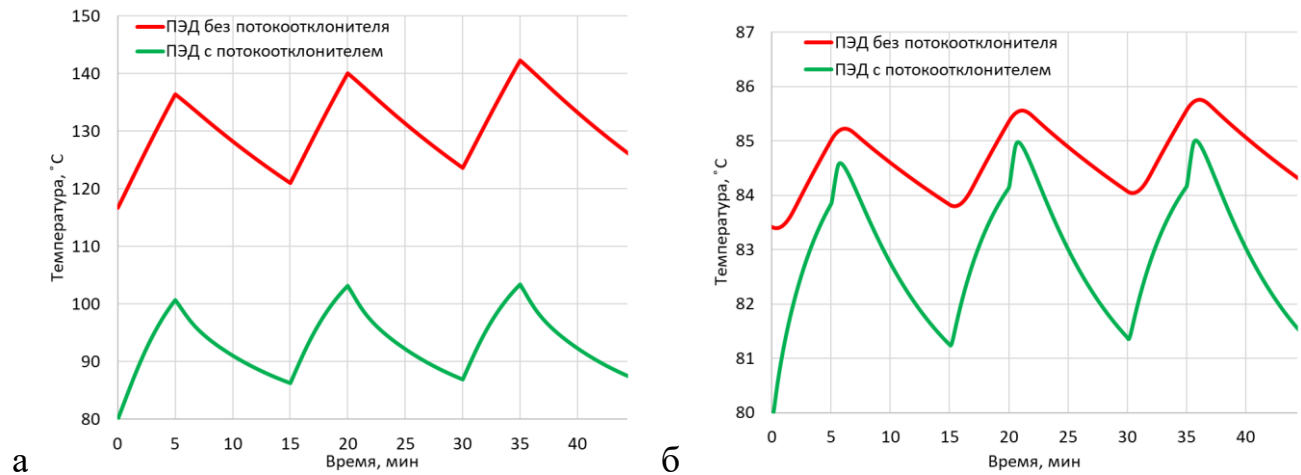
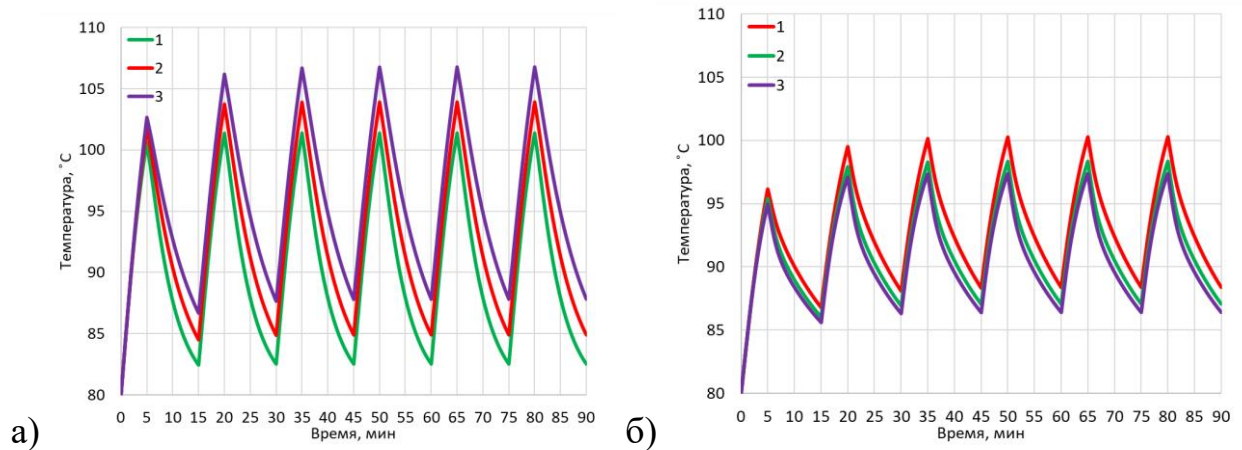


Рисунок 6 – Влияние ПУ на температуру погружного двигателя (а) и омывающей его жидкости (б)

Вследствие улучшений условий теплоотвода от ПЭД благодаря перенаправлению к погружному двигателю потока из затрубного пространства, увеличению скорости потока (от 0,05 до 0,15 м/с) и турбулентности потока (число Re возрастает от 3500 до 7400) теплоотвод от ПЭД интенсифицируется (число Nu возрастает от 16 до 53). В результате максимальная температура в течение цикла периодической откачки существенно снижается: нагрев ПЭД относительно начальной температуры жидкости 80 °C снижается с 62 до 22 °C. Исследовано влияние конструктивных параметров потокоотклоняющего устройства на тепловой режим ПЭД. Установлено, что уменьшение диаметра корпуса потокоотклоняющего устройства способствует снижению температуры ПЭД, при этом наибольший эффект достигается при использовании дополнительных элементов завихрения (пластин оребрения) на внутренней поверхности корпуса, что позволяет снизить максимальную температуру ПЭД на величину до 20% за счет интенсификации теплообмена (Рисунок 7).



а) при различном внутреннем диаметре корпуса потокоотклоняющего устройства (1 – 127 мм, 2 – 137 мм, 3 – 147 мм); б) при диаметре 127 мм и различной площади пластин оребрения (1 – 1 см² (5% проходного сечения), 2 – 5 см² (25%), 3 – 10 см² (50%))

Рисунок 7 – Динамика температуры ПЭД

В главе 4 представлены результаты внедрения и опытно-промышленных исследований разработанных технических решений. Выполнены опытно-промышленные исследования (ОПИ) на добывающей скважине АО «Газпромнефть - ННГ», работающей в ПКР, подтвердившие эффективность разработанного потокоотклоняющего устройства. По результатам ОПИ получено снижение максимальной температуры ПЭД УЭЛН на величину около 13 °С по сравнению с эксплуатацией без устройства.

Разработан способ повышения надежности УЭЛН в ПКР (патент РФ № 2814706), основанный на контроле температуры ПЭД и оптимизации длительности периодов откачки и накопления для поддержания температуры в допустимых пределах. С целью подтверждения эффективности способа проведены опытно-промышленные исследования (ОПИ) на пяти скважинах АО «Газпромнефть - ННГ». В результате ОПИ удалось подобрать оптимальные параметры рабочего режима, обеспечивающие снижение максимальной температуры ПЭД на 6-12 °С при сохранении дебита скважин по жидкости. Выполнена верификация разработанной в рамках диссертационной работы математической модели, которая показала, что неточность определения амплитудной (минимальной и максимальной за цикл откачки) температуры

погружного электродвигателя не превышает 2-3 °С (3%). На примере скважины №4 ОПИ: скважина оборудована УЭЛН 2А габарита с погружным двигателем серии ПВЭДН габаритом 81 мм, номинальная мощность ПЭД 80 кВт. Среднесуточный дебит скважины по жидкости составляет 23 м³/сут, обводненность продукции 50 %. Длительность периодов откачки и накопления по скважине составляла 18 и 42 мин соответственно, при этом максимальная температура ПЭД в этом достигала 114 °С, что близко к верхней границе допустимой температуры 120 °С. Расчеты с использованием математической модели показали, что при снижении длительности периодов откачки и накопления до 9 и 21 мин соответственно среднесуточный дебит скважины по жидкости практически не меняется, при этом максимальная температура ПЭД снижается до 105 °С, т.е. практически на 10 °С. Результаты промысловых замеров подтвердили прогнозы математической модели – фактическая максимальная температура ПЭД снизилась со 114 до 103 °С, т.е. на 11 °С. Сравнение результатов расчета и промысловых замеров представлено на Рисунке 8.

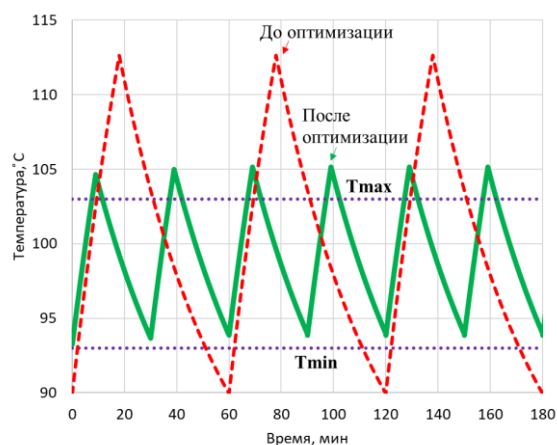


Рисунок 8 – Динамика температуры ПЭД до и после изменения длительности периодов откачки, скв. №4 ОПИ (Tmax, Tmin – фактическая максимальная и минимальная температура ПЭД после изменения)

Полученные в ходе ОПИ результаты подчеркивают важность контроля и оптимизации температурных параметров для обеспечения надежной работы УЭЛН в режиме периодической откачки.

Среди прочих направлений внедрения результатов диссертационной работы разработан и внедрен в производственный процесс АО «НЕГУСНЕФТЬ» Стандарт «Методика расчета теплового режима погружного электродвигателя установки электроприводного центробежного насоса в периодическом режиме эксплуатации». Стандарт используется при расчете и подборе к условиям эксплуатации УЭЛН в ПКР. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет» при подготовке магистров, обучающихся по направлению 21.04.01 Нефтегазовое дело профиля «Управление технологическими процессами эксплуатации и ремонта скважин».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Поставленная в работе цель достигнута благодаря разработке потокоотклоняющего устройства для интенсификации охлаждения ПЭД УЭЛН при работе в ПКР, обоснования эффективности устройства на основе результатов математического моделирования и промысловых исследований.

2 Выполнен статистический анализ данных об отказах более 500 УЭЛН, работающих в ПКР в период с 2015 по 2024 гг. Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на НдО: газовый фактор и концентрация механических примесей (отрицательный коэффициент корреляции в диапазоне 0,6-0,8), плотность нефти и давление насыщения (положительная корреляция 0,4-0,6). Получены эмпирические зависимости для предиктивной оценки НдО УЭЛН в ПКР (множественный коэффициент корреляции составил более 0,8), учитывающие параметры рабочего режима (длительность периода откачки, дебит по жидкости, диаметр обсадной колонны) и свойства перекачиваемой жидкости (газовый фактор, концентрация мехпримесей, плотность нефти, давление насыщения).

3 Разработано потокоотклоняющее устройство (патент РФ на изобретение №2830533), позволяющее интенсифицировать теплоотвод от ПЭД при работе УЭЛН в ПКР. Особенностью устройства является наличие пластин оребрения на внутренней поверхности, интенсифицирующих теплообмен за счет увеличения площади контакта устройства с потоком и его турбулизации, что особенно важно в условиях недостаточного притока пластовой жидкости,

характерного для ПКР, а также перенаправление потока из затрубного пространства, откачиваемого насосом, непосредственно к ПЭД, обеспечивающее его охлаждение в циклическом режиме работы.

4 Разработана математическая модель нестационарного теплообмена в системе «ПЭД – скважинный флюид», позволяющая исследовать влияние параметров работы УЭЛН и свойств жидкости на тепловое поле ПЭД и омывающей его жидкости. Верификация модели на промысловых данных показала высокую точность: отклонение расчетной и измеренной температуры ПЭД не превышает 2-3°C (3%). Установлено, что увеличение длительности периода откачки приводит к росту температуры ПЭД и жидкости до 30%, а увеличение газового фактора и снижение обводненности продукции – к увеличению нагрева ПЭД до 50% из-за ухудшения теплоотвода.

5 На основе результатов численного моделирования показано, что применение потокоотклоняющего устройства позволяет снизить температуру ПЭД в 2-3 раза (на 20-40 °C), причем эффективность охлаждения возрастает с уменьшением внутреннего диаметра устройства и увеличением площади поверхности пластин оребрения. Установлено, что использование пластин оребрения обеспечивает снижение температуры ПЭД до 20% за счет интенсификации теплообмена. Опытно-промысловые испытания разработанного потокоотклоняющего устройства на скважине АО «Газпромнефть-ННГ» подтвердили снижение температуры на 13 градусов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах, наиболее значимыми из которых являются:

- в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1 Рукин, М.В. Исследование эффективности потокоотклоняющего устройства при эксплуатации УЭЛН в периодическом режиме / К.Р. Уразаков, М.В. Рукин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 596-601.

2 Рукин, М.В. Потокоотклоняющее устройство для повышения эффективности погружного двигателя электроприводного центробежного насоса / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 163-172.

3 Рукин, М.В. Особенности теплового режима электропривода погружных центробежных насосов при периодической эксплуатации / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков, Э.О. Тимашев, Н.И. Абызбаев // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т.25, №5. – С.104–115.

- в рецензируемых научных изданиях, включенных в международные базы данных:

4 Рукин, М.В. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме / К.Р. Уразаков, М.В. Рукин, А.О. Борисов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 62-71.

5 Рукин, М.В. Методика определения наработки на отказ установки электроцентробежного насоса / М.В. Рукин, В.А. Молчанова, К.Р. Уразаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 12. – С. 219-229.

- технические объекты интеллектуальной собственности:

6 Патент RU 2830533 С1. Погружная установка электроприводного центробежного насоса с защитным охлаждающим устройством / Рукин М.В., Уразаков К.Р., Борисов А.О. – Заявка от 10.04.2024, опублик. 21.11.2024.

7 Патент RU 2814706 С1. Способ периодической эксплуатации скважины погружной насосной установкой с электроприводом / Рукин М.В., Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Муталова Л.А. – Заявка от 14.06.2023, опублик. 04.03.2024.

- публикации в прочих изданиях:

8 Рукин, М.В. Цифровое численное моделирование тепловых процессов в погружном электродвигателе электроцентробежных установок / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков // Матер. Междунар. науч.–практ. конф.: Цифровые технологии в образовании и практической деятельности. – Уфа, 2022. – С.128–130.

9 Рукин, М.В. Исследование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса в периодическом режиме откачки / М.В. Рукин // Матер. XI Междунар. науч.–практ. конф. – Нижневартовск, 2024 – С. 469–473.

10 Рукин, М.В. Влияние потокоотклоняющего устройства на тепловой режим погружного двигателя электроцентробежного насоса / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков // Матер. VIII Междунар. науч.–практ. конф.: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. – Альметьевск, 2023. – С. 55–59.

11 Рукин, М.В. Повышение эффективности периодической эксплуатации скважин электроцентробежными насосами за счет оптимизации теплового режима / М.В. Рукин // Матер. XIII Междунар. науч.–практ. конф. обучающихся, аспирантов и ученых: Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса. – Тюмень, 2024. – С. 229–232.

12 Рукин, М.В. Влияние параметров периодической откачки на тепловой режим установки электроцентробежного насоса / М.В. Рукин // Матер. Междунар. науч.–техн. конф.: Современные технологии в нефтегазовом деле. – Уфа, 2024. – С. 587–590.

13 Рукин, М.В. Оптимизация теплового режима погружного двигателя электроприводного центробежного насоса / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков, Э.О. Тимашев // Матер. Междунар. науч.–практ. конф.: Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук», посвященной памяти профессора В.Х. Хамаева. – Уфа, 2024 – С. 559–562.

14 Рукин, М.В. Математическое моделирование тепловых процессов при периодической эксплуатации скважины установкой электроцентробежного насоса / М.В. Рукин, К.Р. Уразаков // Матер. Междунар. науч.–практ. конф.: Роль математики в становлении специалиста. – Уфа, 2024. – С. 141–145.