

На правах рукописи



ЛЕНКОВ СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕПНОГО ПРИВОДА
СКВАЖИННОГО ШТАНГОВОГО НАСОСА**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2019

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
Ямалиев Виль Узбекович

Официальные оппоненты: **Валовский Владимир Михайлович**
доктор технических наук, профессор
Татарский научно-исследовательский и
проектный институт нефти (ТатНИПИнефть)
ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина /
дирекция по технике и технологии в
разработке нефтяных месторождений,
советник дирекции института

Науменко Александр Петрович
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
технический университет» / кафедра
«Радиотехнические устройства и системы
диагностики», профессор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный
университет» (г. Ижевск)

Защита диссертации состоится «28» ноября 2019 года в 11:45 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При механизированном способе эксплуатации наибольшее применение получили установки скважинных штанговых насосов (УСШН), которыми оборудовано более половины скважин России. Для УСШН традиционными приводами считаются станки-качалки, которые благодаря постоянному совершенствованию обеспечивают весьма высокую надежность.

Однако, в настоящее время все большее количество крупных месторождений переходит в более позднюю стадию разработки и вводятся в эксплуатацию новые скважины с трудноизвлекаемыми запасами (в частности с высоковязкой нефтью). Это способствует повышению напряженности работы и нагрузок на промышленное оборудование, что приводит к снижению межремонтного периода – увеличению затрат на обслуживание и ремонт.

Для удержания рентабельности эксплуатации малодобитных скважин и выработки месторождений требуется увеличение длины хода полированного штока и снижение числа качаний поверхностного привода. Область применения станка-качалки ограничена, так как увеличение длины хода приводит к резкому увеличению габаритов, массы и, соответственно, стоимости привода.

Необходимость эксплуатации скважин в данных условиях способствовала появлению и распространению длинноходовых приводов безбалансирного типа, получивших название цепные приводы.

Применение цепных приводов позволило обеспечить длинноходовые режимы откачки, сократить расход электроэнергии и повысить КПД установки в целом. Однако, в процессе эксплуатации были выявлены узлы, требующие дальнейшего совершенствования, основным из которых является узел "тяговая цепь" с наибольшим количеством отказов по причине "ослабления" и "обрыва". Отказы тяговой цепи обуславливаются влиянием совокупности факторов, таких как: способ смазки цепи, режим и условия эксплуатации привода. При этом важную роль имеет своевременное обслуживание (регулировка натяжения и смазка цепи) и диагностирование цепного привода скважинного штангового насоса.

В связи с этим, возрастает роль разработки методик контроля технического состояния и модернизации узлов и механизмов установок скважинных штанговых насосов с цепным приводом для повышения надежности и перехода от планово-предупредительных работ на обслуживание по фактическому состоянию оборудования.

Степень разработанности темы исследования

Теоретической и методической основой исследования послужили работы, направленные на изучение и совершенствование цепных приводов скважинных штанговых насосов, отечественных и зарубежных ученых: Риделя К.К., Мехтиева Э.Х., МаксUTOва Р.А., Валовского В.М., Валовского К.В., Вильданова Х.Х., Асфандиярова Х.А., Тахаудинова Ш.Ф., Федосеенко Н.В., Шамсутдинова И.Г., Hards E., Hill F.F., Hunter J.S., Crawford C.E., Bender E.A., Lively G.R., Watson J.L., Takacs G. и других исследователей.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль): пункт 7 – «Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса».

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является повышение надежности реверсирующего редуцирующего преобразующего механизма и разработка методики диагностирования цепного привода скважинного штангового насоса.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1 Вероятностно-статистический анализ отказов и разработка диагностической матрицы скважинного штангового насоса с цепным приводом для уточнения прогнозирования ресурса работы в зависимости от условий его эксплуатации и наработки.

2 Аналитические исследования траектории неравномерного перемещения каретки при реверсе за счет кривизны ее направляющих в противовесе цепного привода.

3 Аналитические расчеты максимальных эквивалентных напряжений и запаса прочности зубчатой цепи с модернизированной скалкой при использовании в реверсирующем редуцирующем преобразующем механизме цепного привода.

4 Разработка стенда цепного привода и проведение экспериментальных исследований изменения вибрационных характеристик в узлах ведомой и ведущей звездочек в зависимости от натяжения тяговой цепи (роликовой и зубчатой).

5 Разработка методики оценки технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса по временным реализациям вибросигналов.

Научная новизна

1 Разработана диагностическая матрица для прогнозирования ресурса работы скважинного штангового насоса (СШН) с цепным приводом по данным со скважин Арланского месторождения; построена зависимость вероятности отказа СШН от количества диагностических признаков, характеризующих условия эксплуатации.

2 Установлены предельные значения показателя Херста, определяющие границы зон технического состояния цепного привода в процессе эксплуатации и оптимальные значения натяжения для роликовой и зубчатой цепи привода.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке диагностической матрицы скважинного штангового насоса для уточнения вероятности отказа с учетом условий эксплуатации, сравнительных аналитических расчетах эквивалентных напряжений вариантов тяговых цепей со скалками и анализе временных рядов вибросигналов стэнда цепного привода с применением статистических методов.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1 Спроектирован и разработан стэнд цепного привода скважинного штангового насоса с натяжным устройством (патент РФ № 158178 на полезную модель) и модернизированной скалкой для зубчатой цепи, который позволяет исследовать процесс влияния изменения натяжения тяговой цепи на возникновение вынужденных колебаний.

2 Разработана методика «Диагностирование технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса в процессе эксплуатации».

3 Подготовлено учебно-методическое пособие «Вибрационная диагностика цепного привода скважинного штангового насоса».

Стэнд, учебно-методическое пособие и методика используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» при подготовке магистров по направлению 21.04.01 «Проектирование, эксплуатация и диагностика технологических процессов и объектов нефтегазового производства» по дисциплине «Оценка технического состояния оборудования нефтегазового производства».

Методы решения поставленных задач

Решение поставленных задач осуществлено путем совокупности аналитических и статистических методов анализа результатов, полученных в

промышленных условиях на скважинах ОАО АНК «Башнефть» и ПАО «Татнефть» и лабораторных исследований на экспериментальном стенде цепного привода с использованием современных приборов измерения параметров вибрации, систем компьютерного моделирования и теоретических расчетов в системе инженерного комплекса «ANSYS Workbench».

На защиту выносятся следующие положения:

1 Диагностическая матрица скважинного штангового насоса для уточнения прогнозирования ресурса работы с использованием метода Байеса.

2 Конструкция реверсирующего редуцирующего преобразующего механизма (РППМ) цепного привода скважинного штангового насоса с зубчатой цепью и модернизированной скалкой.

3 Конструкция экспериментального стенда цепного привода с модернизированным РППМ для проведения вибродиагностических обследований.

4 Результаты экспериментальных исследований влияния натяжения тяговой цепи РППМ на изменение вибрационных характеристик цепного привода.

5 Методика «Диагностирование технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса в процессе эксплуатации», включающая предельные значения показателя Херста, которые позволяют определить границы зон технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса по результатам анализа временных рядов вибросигналов.

Апробация результатов работы

Результаты и основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2014, 2017 гг.); Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения» (Уфа, 2014 г.); Всероссийских научно-методических конференциях «Роль математики в становлении специалиста» (Уфа, 2015, 2016 гг.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения» (Стерлитамак, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Опыт, проблемы и перспективы развития неразрушающих методов контроля и диагностики машин и агрегатов», посвященной 60-летию юбилею филиала УГНТУ и 20-летию лаборатории «Вибродиагностика машин и агрегатов нефтяной промышленности» (Октябрьский, 2017 г.); Международной научно-практической

конференции молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (Альметьевск, 2017 г.); Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Новые технологии в бурении скважин и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа» (Уфа, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Наука и технологии в нефтегазовом деле», посвященной 100-летию Кубанского государственного технологического университета и 25-летию кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» (Краснодар, 2018 г.); 72-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018» (Москва, 2018 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 научных трудов: 2 статьи в научных журналах рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в рецензируемом журнале, включенном в базы данных Scopus и Web of Science, 12 работ в материалах международных и всероссийских конференций, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы из 134 наименований. Материал диссертационной работы содержит 162 страницы машинописного текста, 84 рисунка, 21 таблицу и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи исследований, основные положения выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В **первой главе** обобщен опыт разработки и применения цепных приводов скважинных штанговых насосов (СШН) с момента создания и до настоящего времени. Описаны типовые конструкции цепных приводов отечественного и зарубежного производства и сформулированы основные их конструктивные отличия, преимущества, недостатки и пути совершенствования.

Совершенствования современных конструкций цепных приводов СШН направлены на снижение стоимости изготовления и владения, соответственно, снижение металлоемкости привода и увеличение межремонтного периода.

Снижение металлоемкости возможно за счет исполнения привода открытого типа, что в свою очередь ухудшает условия эксплуатации тяговой цепи (в частности способ смазки) и возрастает необходимость применения втулочно-роликовой цепи с закрытыми шарнирами, заполняемыми смазкой при ее изготовлении. Однако, возможно применение плотных фильтрующих тканей (вазопрон, сипрон и другие) в качестве закрытого корпуса, которые способны исключить накопление конденсата (запотевание), обеспечить фильтрацию воздуха и снизить стоимость привода.

Смазка тяговой цепи в приводе осуществляется за счет погружения двух ковшей в ванну с маслом, установленных на противовесе и имеющих направленные отверстия, через которые масло вытекает на тяговую цепь при возвратно-поступательном движении противовеса. При таком способе смазки: участок тяговой цепи в месте крепления скалки не смазывается напрямую, а только за счет стекания масла с выше смазанного участка; использованное масло вместе с механическими примесями собирается в емкость и повторно используется; происходит разбрызгивание масла, так как смазывание происходит в течение всего возвратно-поступательного движения (в частности ПЦ-60-3,0-0,5/2,5 длина хода 3 метра). Однако, смазка тяговой цепи возможна струйной подачей масла в месте выхода цепи из зацепления с ведущей звездочкой, что позволит обеспечить смазку всех звеньев цепи и снизить разбрызгивание масла.

Надежность оборудования также во многом зависит от своевременного и квалифицированного обслуживания. Однако, в настоящее время отсутствуют методики диагностирования технического состояния цепного привода СШН, которые позволили бы проводить обслуживание и ремонтные работы не по графику планово-предупредительных работ (ППР), а по фактическому состоянию оборудования.

Во **второй главе** рассмотрено прогнозирование ресурса работы скважинного штангового насоса с цепным приводом. Проведен вероятностно-статистический анализ отказов по промышленным данным (со скважин Арланского месторождения ОАО АНК «Башнефть»).

Диагностирование технического состояния в процессе эксплуатации имеет важную роль в нормальной работе глубинного оборудования (динамометрирование), так как позволяет своевременно идентифицировать развитие отказа или отклонения от технологического режима. Однако, обслуживание оборудования производится согласно разработанному графику ППР, основанному на статистических данных завода изготовителя. Для более

корректного планирования ремонтных работ необходимо учитывать не только статистические данные отказов оборудования для данного региона, но и условия эксплуатации скважин.

Установлено, что распределение случайной величины (наработка до отказа СШН с цепным приводом) подчиняется закону Вейбулла. Прогнозирование ресурса оборудования вероятностно-статистическими методами на основе закона распределения случайной величины, обусловлено не только отсутствием исчерпывающей информации об эксплуатации системы, но и разбросом показателя долговечности (наработка на отказ), который обладает большой чувствительностью к влиянию различных факторов. Для уточнения прогнозирования вероятности отказа СШН с использованием метода Байеса разработана диагностическая матрица (таблица 1).

Таблица 1 – Диагностическая матрица для скважинного штангового насоса с цепным приводом

диагноз	Признак K_j								
	Число ходов в минуту K_1			Глубина подвески насоса K_2 , м			Коэффициент подачи насоса K_3		
	K_{11} <1,4	K_{12} 1,4-2,3	K_{13} >2,3	K_{21} 700-900	K_{22} 900-1100	K_{23} 1100-1300	K_{31} <0,33	K_{32} 0,33-0,66	K_{33} >0,66
	$P(K_{11}/D_1)$	$P(K_{12}/D_1)$	$P(K_{13}/D_1)$	$P(K_{21}/D_1)$	$P(K_{22}/D_1)$	$P(K_{23}/D_1)$	$P(K_{31}/D_1)$	$P(K_{32}/D_1)$	$P(K_{33}/D_1)$
D_1	0,358	0,327	0,315	0,481	0,284	0,235	0,062	0,253	0,685
D_2	0,247	0,364	0,389	0,299	0,325	0,377	0,234	0,338	0,428
диагноз	Признак K_j								
	Затрубное давление K_4 , МПа			Диаметр плунжера K_5 , мм			Содержание воды K_6 , %		
	K_{41} <0,6	K_{42} 0,61-1,2	K_{43} >1,21	K_{51} 27	K_{52} 32	K_{53} 44	K_{61} <0,33	K_{62} 0,33-0,66	K_{63} >0,66
	$P(K_{41}/D_1)$	$P(K_{42}/D_1)$	$P(K_{43}/D_1)$	$P(K_{51}/D_1)$	$P(K_{52}/D_1)$	$P(K_{53}/D_1)$	$P(K_{61}/D_1)$	$P(K_{62}/D_1)$	$P(K_{63}/D_1)$
D_1	0,469	0,284	0,247	0,346	0,333	0,321	0,346	0,333	0,321
D_2	0,416	0,337	0,247	0,299	0,338	0,364	0,273	0,247	0,481

где диагноз D_1 – безотказная работа; диагноз D_2 – отказ.

Применение диагностической матрицы позволяет скорректировать компенсирующие мероприятия и сроки проведения ремонтов с учетом условий эксплуатации для обеспечения нормальной работы СШН с цепным приводом.

При использовании диагностической матрицы были рассчитаны возможные вариации сочетаний диагностических признаков и построены зависимости минимальных значений вероятности отказа СШН от количества диагностических признаков, определяющих условия эксплуатации (Рисунок 1).

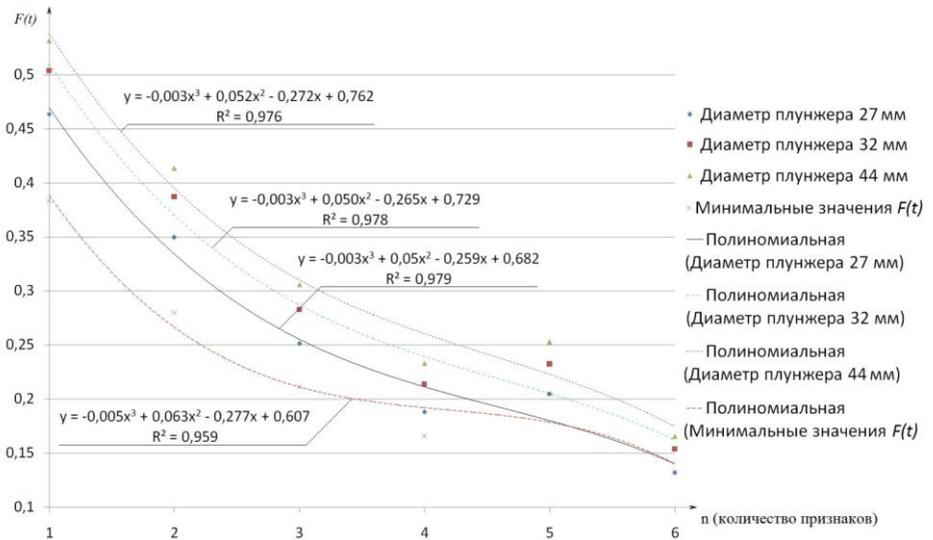


Рисунок 1 – Зависимость минимальных значений вероятности отказа СШН от количества участвующих в уточняющем расчете диагностических признаков

Уточнение вероятности отказа СШН наиболее эффективно при использовании четырех диагностических признаков (число ходов в минуту, глубина подвески насоса, коэффициент подачи насоса и содержание воды) или всех шести диагностических признаков. Минимальные значения вероятности отказа СШН наблюдаются при следующих условиях эксплуатации: число ходов в минуту менее 1,4; глубина подвески насоса менее 900 м; коэффициент подачи насоса более 0,66; затрубное давление менее 0,6 МПа и содержание воды в интервале 0,33-0,66.

Третья глава посвящена совершенствованию реверсирующего редуцирующего преобразующего механизма цепного привода СШН.

В ОАО АНК «Башнефть» общее количество отказов цепных приводов по 36 скважинам составляет 329 ед., из которых большее количество отказов у узла – тяговая цепь (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Распределение отказов цепного привода по узлам в ОАО АНК «Башнефть»

При рассмотрении отказов цепных приводов в ПАО «Татнефть» за 5 месяцев 2015 года и 5 месяцев 2016 года установлено, что наибольшее количество отказов – в узле тяговой цепи, и составляет более 60% (по причине ее ослабления и обрыва).

Отказы тяговой цепи обуславливаются тем, что в процессе эксплуатации, помимо естественного износа звеньев, происходит удлинение цепи, которое может привести к уменьшению угла охвата звездочек и к появлению переменных нагрузок, вследствие увеличения колебаний или вибраций. Это влияет на неравномерность распределения нагрузочных/тяговых усилий на звенья цепи и на зубья звездочек. Также большое влияние оказывает конструктивное исполнение цепного привода (открытого или закрытого типа) и, соответственно, способ смазки цепи.

Особенностью конструкции РРПМ является появление динамических нагрузок при больших скоростях во время смены хода, воздействующих на колонну штанг и привод, которые во многом зависят от радиуса ведомой и ведущей звездочек, что следует из общеизвестной формулы центростремительного ускорения и второго закона Ньютона.

Снижение динамических нагрузок возможно за счет применения направляющих с непостоянным радиусом кривизны траектории движения точки крепления скалки к тяговой цепи на участке реверса (огибания радиуса звездочки).

Известно техническое решение (патент РФ № 2150607 от 06.10.1998г.), в котором предлагается применение направляющих тяговой цепи для увеличения длины хода плунжера СШН без увеличения амплитуды нагрузок на штанги. Однако, данное решение не было исследовано и не получило дальнейшего применения.

Проведен кинематический анализ аналогичного технического решения для определения перемещения, скорости и ускорения в точке подвеса штанг, при использовании направляющих каретки в противовесе с постоянным радиусом кривизны. Данное решение позволяет обеспечить необходимый непостоянный радиус кривизны траектории движения точки крепления скалки к тяговой цепи.

Результаты проведенных расчетов ускорений в точке подвеса штанг для разных радиусов кривизны направляющих каретки в противовесе цепного привода построены на графиках для сравнения выпуклой и прямолинейной траекторий (Рисунок 3), вогнутой и прямолинейной траекторий (Рисунок 4).

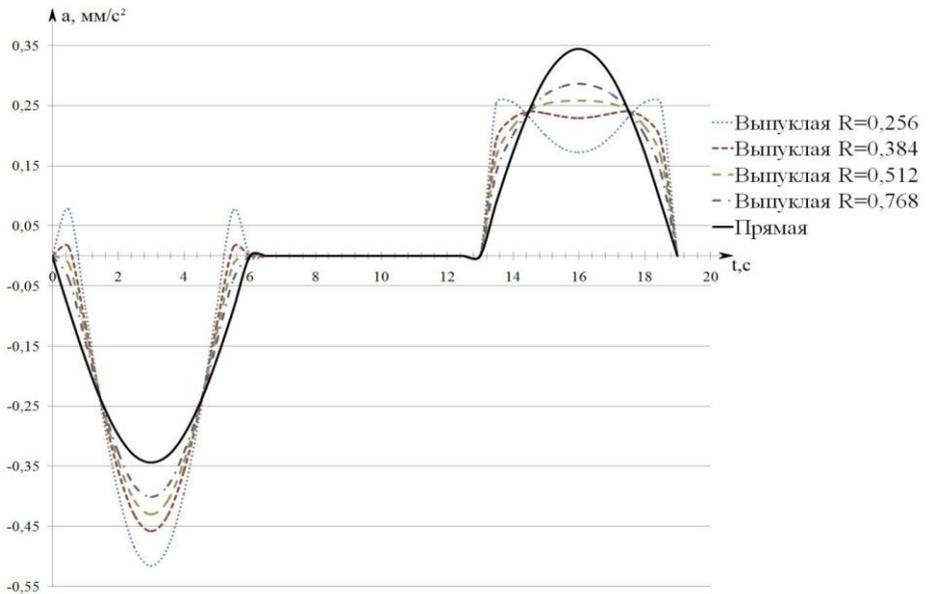


Рисунок 3 – Графики ускорений выпуклой и прямолинейной траекторий движения каретки

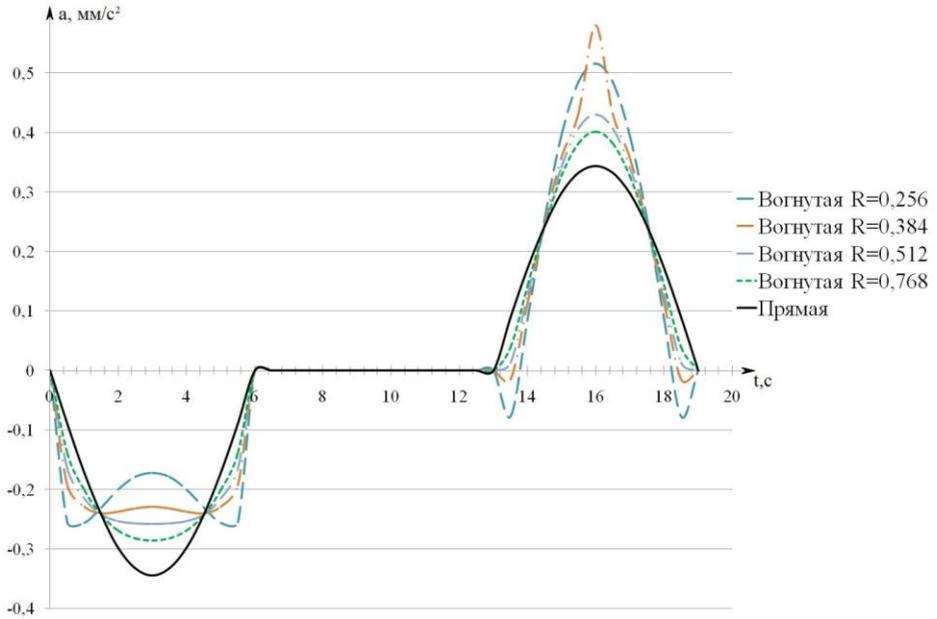


Рисунок 4 – Графики ускорений вогнутой и прямолинейной траекторий движения каретки

На графиках (Рисунок 3 и 4) показано, что выпуклая и вогнутая траектории движения каретки в противовесе являются симметрично противоположными по изменению ускорений. Это говорит о том, что при движении по вогнутой траектории происходит снижение ускорения (равномернее) в конце хода при спуске колонны штанг и в начале подъема продукции, но возрастает при торможении подъема продукции и в начале спуска штанг. При движении по выпуклой траектории изменение ускорения происходит в противоположном направлении.

Произведенные расчеты наглядно показали, что снижение величины ускорения в одном интервале приводит к большему возрастанию в симметричном интервале траектории движения каретки.

При перемещении каретки по прямолинейной траектории движения происходит наиболее равномерное изменение ускорения и, соответственно, равномерный износ узлов и деталей, что повышает надежность оборудования в целом.

Для повышения надежности узла тяговой цепи предложено применение зубчатой цепи с модернизированной скалкой.

Для определения эквивалентных напряжений созданы виртуальные 3D модели скалок (стандартной и с перегородкой) с роликовой цепью вариант 1 (стандартные пластины шаг 50,8 мм по ГОСТ 13568-97) и вариант 2 (специальный контур пластин шаг 50,8 мм), модернизированной скалки с зубчатой цепью (шаг 31,75 мм по ГОСТ 13552-81) и проведены расчеты методом конечных элементов на программном комплексе «ANSYS Workbench» (Рисунок 5).

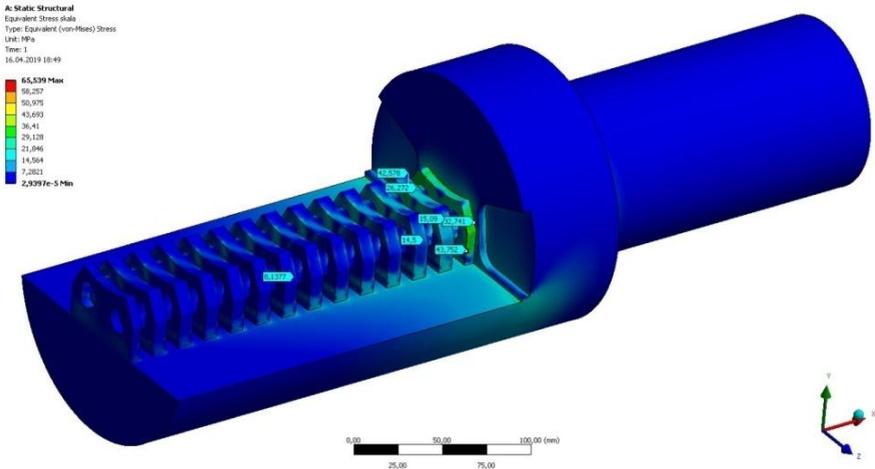


Рисунок 5 – Результаты расчета эквивалентных напряжений в модели модернизированной скалки

Для моделей скалок с тяговыми цепями были заданы одинаковые характеристики материала, что было сделано для определения наилучшего конструктивного исполнения по распределению максимальных эквивалентных напряжений и запасу прочности.

Таблица 2 – Результаты расчетов распределений эквивалентных напряжений в моделях скалок и запаса прочности

Вид напряжения	Стандартная скалка			Скалка с перегородкой			Модернизированная скалка		
	В теле	В опасном сечении	Валик в скалке	В теле	В опасном сечении	Валик в скалке	В теле	В опасном сечении	Валик в скалке
Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	255,620	82,012	139,710	97,115	37,620	40,301	65,539	14,500	45,194
Коэффициент запаса прочности	1,838			2,995			5,764		

По результатам расчетов (таблица 2) установлено, что применение модернизированной скалки для зубчатой цепи относительно скалки с перегородкой позволяет снизить максимальные эквивалентные напряжения в теле на 32,51% и в опасном сечении на 61,45%, а коэффициент запаса прочности увеличить в 1,9 раза.

Максимальные эквивалентные напряжения в валиках модернизированной скалки относительно стандартной скалки снижаются на 67,65%, однако, относительно скалки с перегородкой повышаются на 12,10% и это объясняется тем, что они состоят из двух сегментных вкладышей.

Исполнение валиков крепления зубчатой цепи к модернизированной скалке цельными – снизит эквивалентные напряжения и повысит их надежность.

Таблица 3 – Результаты расчетов распределений эквивалентных напряжений в пластинах тяговых цепей

Вид напряжения	Роликовая цепь вариант 1	Роликовая цепь вариант 2	Зубчатая цепь
Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	50,559	46,068	31,899

Расчеты (таблица 3) показывают, что максимальные эквивалентные напряжения в пластине звена зубчатой цепи достигают 31,899 МПа, что на 36,91% меньше относительно звена роликовой цепи варианта 1.

Наилучшей конструкцией (в плане снижения максимальных эквивалентных напряжений и повышения запаса прочности) является зубчатая цепь с модернизированной скалкой, у которой относительно стандартной скалки максимальные эквивалентные напряжения в теле снижаются на 74,36% и в опасном сечении на 82,31%, а коэффициент запаса прочности увеличивается в 3,1 раза.

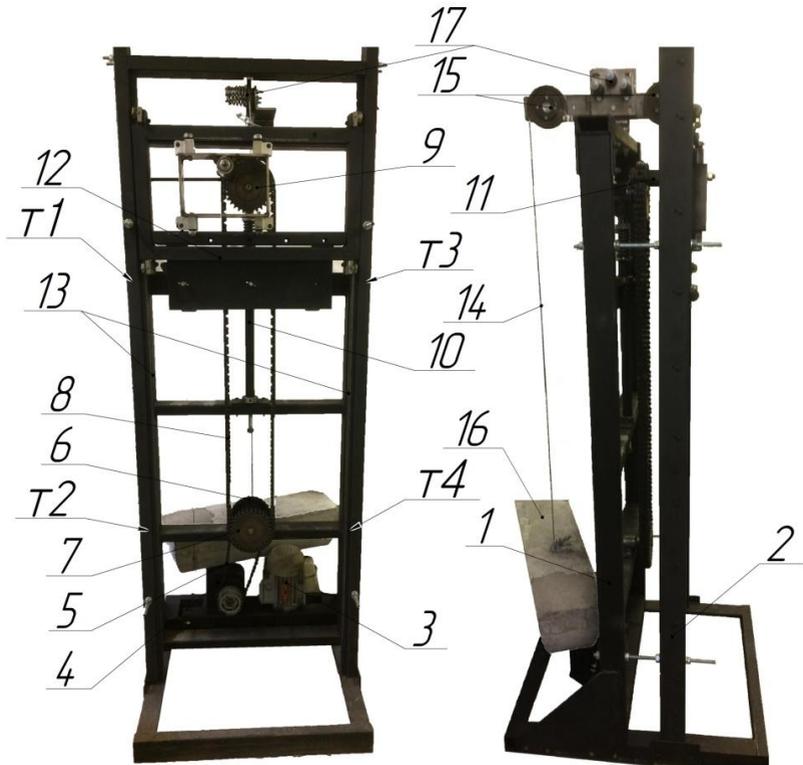
В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния изменения натяжения тяговой цепи на общий уровень вибрации и дана оценка технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса с применением показателя Херста.

Для исследования влияния натяжения тяговой цепи на общий уровень вибрации был смоделирован и разработан стенд цепного привода скважинного штангового насоса, особенностью которого является возможность установить в качестве тяговой цепи – роликовую или зубчатую цепь (Рисунок 6).

Основным условием моделирования было принято геометрическое подобие, которое являлось пропорциональностью длины хода полированного штока и делительного радиуса ведомой и ведущей звездочек. В геометрически подобных системах, двигаясь по подобным траекториям, «предметы» проходят

геометрически подобный путь за промежуток времени, отношение которых является константа подобия.

Таким образом, согласно теории подобия, процесс преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное в цепном приводе, воспроизведенный на геометрически подобной модели, можно рассматривать как совокупность подобных элементарных процессов, каждый из которых происходит в определенном масштабе, характеризующемся численным значением соответствующей константы подобия.



1 – рама станда, 2 – рама с возможностью регулировки, 3 – электродвигатель, 4 – редуктор, 5 – роликовая цепь, 6 – кассета звездочек, 7 – ведущая звездочка, 8 – замкнутое гибкое звено (тяговая цепь), 9 – ведомая звездочка, 10 – натяжное устройство цепи, 11 – скалка каретки, 12 – противовес, 13 – направляющие противовеса, 14 – гибкое звено (соединяющее противовес с устьевой подвеской), 15 – направляющий шкив, 16 – устьевая подвеска (груз), 17 – устройство, имитирующее работу насоса

Рисунок 6 – Экспериментальный стенд цепного привода СШН

Для имитации работы насоса было разработано устройство 17 (Рисунок 6), которое создает трение на гибком звене 14 (стальной трос) и дополнительное усилие при поднятии груза, а также оно воспринимает часть нагрузки при спуске груза 16.

Перед началом исследований были определены места установки вибродатчиков. Из-за того, что установить датчики на тяговую цепь невозможно, наиболее выгодные места (точки t1-t4) для установки датчика находятся на раме станда цепного привода на уровне опор ведомой и ведущей звездочек (Рисунок 6).

Одним из основных параметров при проведении экспериментов является натяжение тяговой цепи, диапазон которого изменяется от 10 до 40 мм.

В результате экспериментальных исследований получены данные в виде значений максимальных амплитуд вибрации (виброскорости), по которым были рассчитаны средние значения (Рисунок 7).

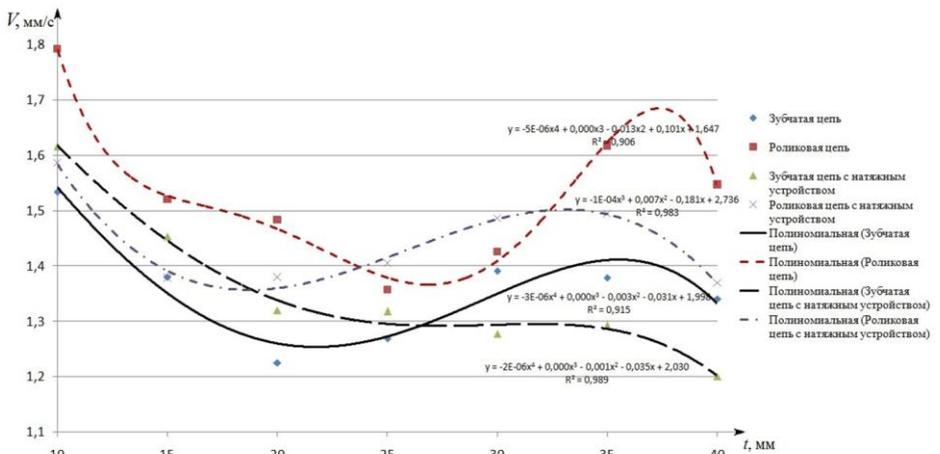


Рисунок 7 – Изменение амплитуды виброскорости на раме станда цепного привода в зависимости от натяжения тяговой цепи

По графику изменения амплитуды виброскорости на раме станда цепного привода от натяжения тяговой цепи видно, что наименьшие амплитуды вибрации для роликовой цепи находятся в интервале 22-30 мм и для зубчатой цепи в интервале 18-25 мм.

Для дальнейшего анализа временных рядов вибросигналов стэнда цепного привода для роликовой и зубчатой цепей при различных натяжениях были произведены расчеты показателя Херста и рассчитана относительная погрешность расчета формулы Херста с учетом погрешности измерительного прибора, которая составила 7,19%.

Показатель Херста количественно характеризует меру упорядоченности амплитуд измеряемого параметра во времени. При значениях показателя Херста: $H < 0,5$ временной ряд антиперсистентный и устойчивость зависит от того, насколько H близок к 0; при $H = 0,5$ временной ряд стохастичен «белый шум», что говорит о случайном процессе; при $H > 0,5$ персистентный или трендоустойчивый временной ряд, при котором происходит сохранение тенденции в будущем. Переход сложной технической системы к хаотическому изменению режима служит признаком существования дефекта оборудования.

По полученным значениям показателя Херста (с корректировкой на рассчитанную относительную погрешность) были построены полиномиальные аппроксимации зависимости значений показателя Херста от натяжения цепи, которые приведены на Рисунке 8 – для зубчатой цепи и Рисунке 9 – для роликовой цепи.

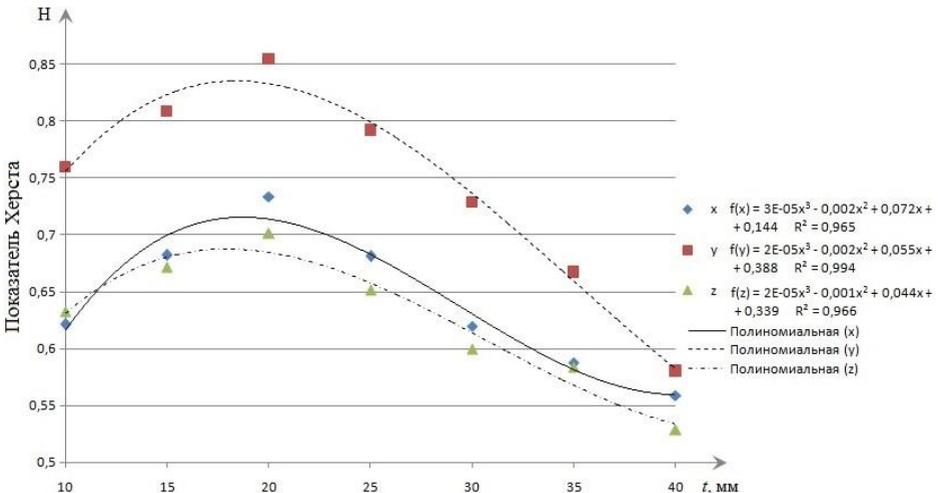


Рисунок 8 – Полиномиальная аппроксимация зависимости значений показателя Херста от натяжения зубчатой цепи

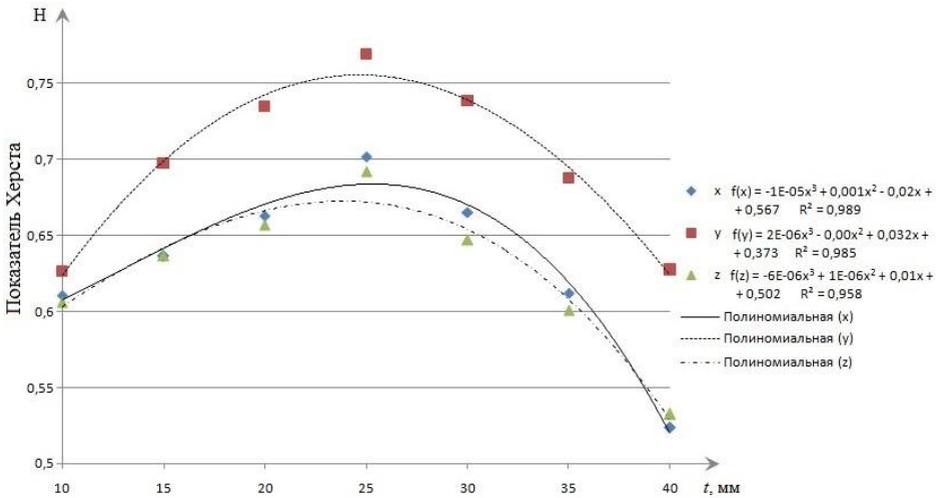


Рисунок 9 – Полиномиальная аппроксимация зависимости значений показателя Херста от натяжения роликовой цепи

Как видно из Рисунков 8 и 9, наиболее высокое значение показателя Херста для зубчатой цепи находится при натяжении 20 мм, а для роликовой цепи при натяжении 25 мм. Полученные максимальные значения показателя Херста говорят об эффективных условиях работы цепного привода при данных натяжениях цепи.

Для проведения технической диагностики цепного привода в процессе эксплуатации установлены предельные значения показателя Херста, определяющие границы зон технического состояния: «допустимо», «еще допустимо», «требуется принятия мер» и «не допустимо» (Рисунок 10 и 11).

Зоны технического состояния для зубчатой цепи (Рисунок 10) при натяжении 20 мм: «допустимо» при показателе Херста $N > 0,813$; «еще допустимо» при $N = 0,813-0,704$; «требуется принятия мер» при $N = 0,704-0,595$; «не допустимо» при $N < 0,595$.

Зоны технического состояния для роликовой цепи (Рисунок 11) при натяжении 25 мм: «допустимо» при показателе Херста $N > 0,861$; «еще допустимо» при $N = 0,861-0,745$; «требуется принятия мер» при $N = 0,745-0,630$; «не допустимо» при $N < 0,630$.

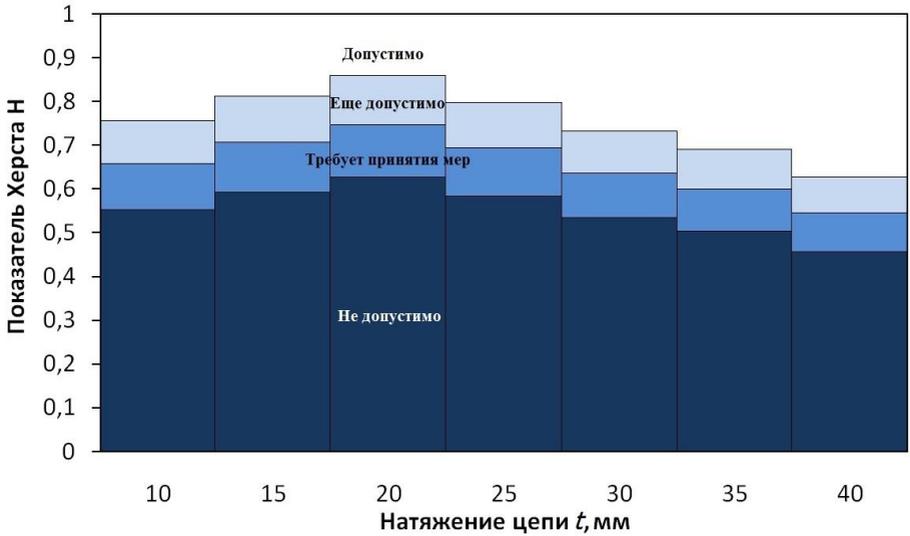


Рисунок 10 – Зоны технического состояния цепного привода с тяговой (зубчатой) цепью

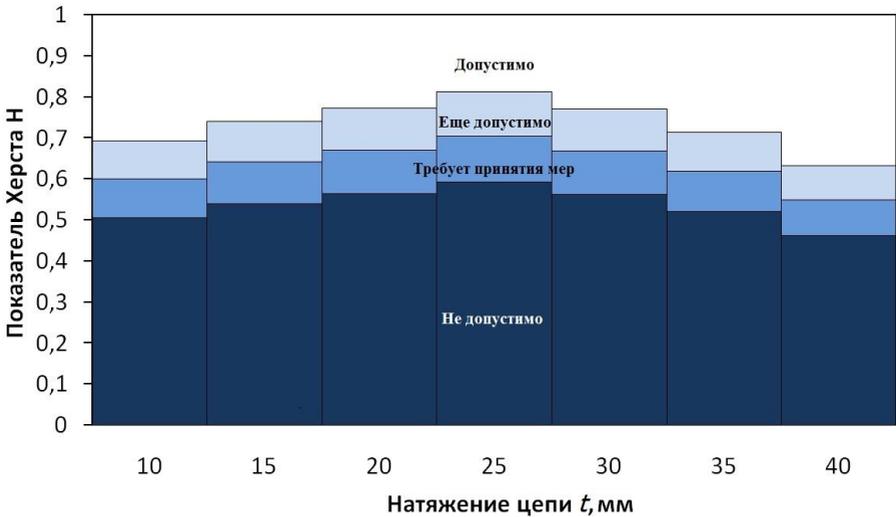


Рисунок 11 – Зоны технического состояния цепного привода с тяговой (роликовой) цепью

Установленные зоны технического состояния цепного привода возможно использовать для диагностирования (с учетом константы подобия) со

следующими рабочими параметрами: наибольшее тяговое усилие 60 кН, число ходов в минуту $n = 3$ и рабочий ход плунжера насоса 3 метра. Для цепных приводов с другими техническими характеристиками и режимом эксплуатации необходима наработка статистических данных и определение новых предельных значений показателя Херста, определяющих границы зон технического состояния.

Для повышения достоверности заключения о техническом состоянии, рекомендуется проводить сбор и перерасчет полученных данных временных рядов вибросигналов. Дальнейшее накопление и дополнение данных позволит уточнить и расклассифицировать границы зон технического состояния на характерные (возможные) дефекты и отказы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Разработана диагностическая матрица для прогнозирования работы скважинного штангового насоса с цепным приводом по материалам со скважин Арланского месторождения, которая позволяет уточнить вероятность отказа оборудования в зависимости от условий эксплуатации и наработки. По результатам расчетов возможных вариаций сочетания диагностических признаков построена зависимость минимальных значений вероятности отказа СШН от количества применяемых диагностических признаков, определяющих условия эксплуатации.

2 Построены зависимости изменения ускорения в точке подвеса штанг в зависимости от направляющих каретки в противовесе цепного привода с постоянным радиусом кривизны. При перемещении каретки по прямолинейной траектории движения происходит наиболее равномерное изменение ускорения и, соответственно, равномерный износ узлов и деталей, что повышает надежность оборудования в целом.

3 По результатам аналитических исследований зубчатая цепь с модернизированной скалкой рекомендуется к проведению промышленных испытаний, так как способствует снижению максимальных напряжений в пластинах звеньев цепи на 36,91%, в опасном сечении скалки на 82,31%, в теле скалки на 74,36% и увеличению коэффициента запаса прочности в 3,1 раза.

4 Разработан стенд цепного привода, особенностью которого является возможность установки модернизированной скалки с зубчатой цепью или стандартной скалки с роликовой цепью в реверсирующий редуцирующий преобразующий механизм и натяжного устройства. В результате экспериментальных исследований с достоверностью 95% установлены диапазоны значений натяжения тяговой цепи при наименьших амплитудах вибрации – для роликовой цепи диапазон 22-30 мм и зубчатой цепи 18-25 мм.

5 В результате анализа временных рядов вибросигналов построены зависимости значений показателя Херста от натяжения тяговой цепи, установлены предельные значения показателя Херста, определяющие границы зон технического состояния цепного привода скважинного штангового насоса и разработана методика диагностирования.

Рекомендации. Результаты исследований диссертации могут быть использованы для проведения обслуживания и мониторинга технического состояния цепных приводов СШН, прогнозирования ресурса работы и планирования планово-предупредительных работ СШН с цепным приводом.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Проведение промышленных испытаний цепного привода СШН с зубчатой цепью и модернизированной скалкой в составе реверсирующего редуцирующего преобразующего механизма, разработка систем контроля и управления с алгоритмами по оптимизации режимов работы и предотвращения аварийных ситуаций по данным мониторинга технического состояния оборудования и рабочих параметров.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах:

Публикации в рецензируемом научном журнале ВАК, включенном в базы данных Scopus и Web of Science:

1. Ленков, С.Н. Вибродиагностические исследования на стенде цепного привода штангового скважинного насоса / С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев, С.Г. Зубаиров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 76-82.

Публикации в рецензируемых научных журналах ВАК:

2. Ленков, С.Н. Диагностирование состояния цепного привода на основе статистического анализа вибросигналов / С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев // Известия

Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 1(2). – С. 251-255.

3. Ленков, С.Н. Анализ работы цепных приводов штанговых скважинных насосов в ОАО АНК «Башнефть» / С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 81-85.

Патент:

4. Пат. 158178 Российская Федерация, МПКF16Н7/08. Натяжное устройство цепного привода / Ямалиев В.У., Ленков С.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГНТУ». – № 2014143498; заявл. 28.10.2014, опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. – 5 с: ил.

Прочие печатные издания:

5. Шалимов, Е.И. О проблеме повышения надежности цепного привода штангового скважинного насоса / Е.И. Шалимов, С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев // Нефть и газ – 2018: сб. тр. 72-ой Междунар. молодеж. науч. конф. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. – 2018. – С. 342-347.

6. Шалимов, Е.И. Техническая диагностика цепного привода штангового скважинного насоса / Е.И. Шалимов, С.Н. Ленков, В.У. Ямалиев // Нефть и газ – 2018: тез. докл. 72-ой Междунар. молодеж. науч. конф. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. – 2018. – Т. 2. – С. 253.

7. Ленков, С.Н. Усовершенствование узла скалки и тяговой цепи цепного привода / С.Н. Ленков, Е.И. Шалимов // Наука и технологии в нефтегазовом деле: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию Кубан. гос. технолог. ун-та и 25-летию кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» Армавир. механико-технол. ин-та. – Краснодар: ФГБОУ ВО «КубГТУ». – 2018. – С. 48-50.

8. Ленков, С.Н. Вибродиагностические обследования на стенде цепного привода штангового скважинного насоса / С.Н. Ленков // Опыт, проблемы и перспективы развития неразрушающих методов контроля и диагностики машин и агрегатов: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию юбилею филиала УГНТУ в г. Октябрьском и 20-летию лаборатории «Вибродиагностика машин и агрегатов нефтяной промышленности». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2017. – С. 288-293.

9. Шалимов, Е.И. Анализ напряженно-деформированного состояния узла скалки и тяговой цепи цепного привода / Е.И. Шалимов, С.Н. Ленков // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. – 2017. – Т. 2. – С. 358-361.

10. Шалимов, Е.И. Применение цепных приводов штанговых скважинных насосов и пути повышения надежности / Е.И. Шалимов, С.Н. Ленков // Новые технологии в бурении скважин и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа: сб. трудов I Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2017. – С. 79-80.

11. Шалимов, Е.И. Пути повышения надежности цепного привода типа ПЦ 60-3-0,5/2,5 производства БМЗ / Е.И. Шалимов, С.Н. Ленков // 68-ая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2017. – Кн. 1. – С. 325-326.

12. Ленков, С.Н. Вибрационная диагностика стенда цепного привода скважинных штанговых насосов / С.Н. Ленков // Роль математики в становлении специалиста: материалы Всероссийской научно-методич. конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016. – С. 102-103.

13. Ленков, С.Н. Стенд цепного привода с редуцирующим преобразующим механизмом / С.Н. Ленков // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения: сб. материалов Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – Т. II. – С. 123-125.

14. Ленков, С.Н. Оценка показателей надежности штангового скважинного насоса с цепным приводом с использованием формулы Байеса / С.Н. Ленков // Роль математики в становлении специалиста: материалы Всероссийской науч.-методич. конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – С. 7-10.

15. Ленков, С.Н. Отказы штанговых глубинных насосов с цепным приводом / С.Н. Ленков // Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения: материалы III Всероссийской науч.-техн. конф. – Уфа: РИЦ УГНТУ. – 2014. – С. 114-117.

16. Ленков, С.Н. Цепной привод штангового скважинного насоса / С.Н. Ленков, В.И. Чинов, Т.А. Утемисов // 65-ая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф. – Уфа: РИЦ УГНТУ. – 2014. – Кн. 1. – С. 181.