

На правах рукописи



Попова Янина Дмитриевна

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ ПРОДУКЦИИ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие
системы (в технических системах)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» на кафедре «Информационно-измерительных систем».

Научный руководитель: **Ермолкин Олег Викторович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Информационно-измерительных систем ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», г. Москва

Официальные оппоненты: **Слепцов Владимир Владимирович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры КБ-6 «Приборы и информационно-измерительные системы» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Москалев Игорь Николаевич,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель заведующего научно-исследовательской лабораторией «Ударно-волновые технологии» ЧОУ ВО «Московский университет имени С.Ю. Витте», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

Защита состоится «5» июня 2019 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.211.04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение высокопродуктивной и безаварийной добычи газа в значительной степени зависит от технической грамотной эксплуатации скважин, режим работы которых устанавливается на основе достоверной информации об основных устьевых параметрах: дебита продукции и динамики его изменения, фазового состава, включая примеси воды и песка, давления и температуры. Информация о количестве примесей при различных режимах по дебиту является ключевой при выборе безаварийного режима эксплуатации скважин, особенно на поздних стадиях разработки месторождений, характеризующихся наличием пластовой воды и абразивных примесей. Например, при работе скважин с дебитами, при которых отмечается высокий уровень концентрации примесей, могут возникать аварийные ситуации: выход из строя скважинного оборудования из-за абразивного износа, обводнение и разрушение призабойной зоны пласта, образование водо-песчаных пробок, приводящих к остановке скважин.

Получение актуальной информации об основных устьевых параметрах связано со многими трудностями, обусловленными спецификой эксплуатации месторождений. Так, продукция подавляющего большинства газовых и газоконденсатных скважин, обеспечивающих основной объём добычи газа в России, отличается многофазными (газ + газовый конденсат + примеси воды и песка) высокоскоростными потоками с высокими газовыми факторами. Жидкие примеси могут составлять от десятитысячных до сотых долей от общего объёма смеси при рабочих термобарических условиях, а твёрдые примеси – менее чем миллионные доли. Измерение расхода фаз в таком потоке смеси без предварительной сепарации является сложной научно-технической задачей, для решения которой необходимы специальные технические средства комплексного контроля параметров потока продукции – многофазные расходомеры. Следует учитывать и то, что основной объём газодобычи в России приходится на долю малообустроенных месторождений Крайнего Севера со сложными природно-климатическими и геолого-техническими условиями. Поэтому используемые средства измерения должны отличаться высокой надёжностью работы в широком динамическом диапазоне температур, а также возможностью автономной работы на неэлектрифицированных скважинах.

Решением проблемы комплексного оперативного контроля основных параметров сложных многофазных потоков продукции скважин в настоящее время занимается ряд отечественных и зарубежных фирм. Ими предложены различные многофазные измерители и датчики-сигнализаторы примесей. Однако большинство из них оказываются малоэффективными для измерения расхода фаз потоков с высокими газовыми факторами.

Практический интерес для измерения расхода фаз многофазного потока представляет *спектрометрический метод*, областью эффективной работы которого являются именно потоки с высокими газовыми факторами. Под этим названием подразумевается группа методов, основанная на анализе частотных характеристик пульсаций давления, возникающих при движении многофазного потока через специальное сужающее устройство и регистрируемых оригинальным измерительным преобразователем. Анализ спектра турбулентных пульсаций давления в

звуковом низкочастотном диапазоне позволяет определять расходные характеристики основной продукции с разделением по фазам. Анализ спектра ударного воздействия примесей воды и песка в ультразвуковом диапазоне частот позволяет отдельно контролировать вынос этих примесей.

Степень разработанности темы исследования. В работе отмечен и проанализирован вклад учёных, работы которых связаны с темой диссертации:

- Мелик-Шахназарова А.М., Алиева Т.М., Тер-Хачатурова А.А., Моисеенко А.С., Коловертнова Ю.Д. в области информационно-измерительных систем нефтегазовой отрасли;
- Браго Е.Н., Ермолкина О.В., Москалева И.Н. в области расходомерии многофазных потоков продукции скважин.

Целью диссертационной работы является модификация спектрометрического метода измерения расхода фаз многофазных потоков путём расширения его функциональных возможностей при контроле содержания примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин и создание на этой основе новой информационно-измерительной системы (ИИС).

Достижение этой цели предполагает решение следующих задач.

1. Анализ существующих методов и средств контроля расходных параметров сложных многофазных потоков продукции скважин и исследование возможности их применения при измерении расхода фаз потоков с высокими газовыми факторами, включая контроль примесей воды и песка.
2. Модификация спектрометрического метода измерения расхода фаз, его совершенствование и исследование возможности применения для количественной оценки примесей воды и песка в продукции скважин.
3. Разработка измерительного преобразователя информационных сигналов каналов регистрации примесей; исследование измерительного преобразователя на экспериментальной установке, создающей водо- и песковоздушные потоки.
4. Разработка новой методики и проведение климатических испытаний с целью проверки воспроизводимости выходных сигналов измерительных преобразователей при эксплуатации в экстремальных температурных условиях.
5. Разработка и исследование информационных моделей, функционально связывающих количество примесей песка и воды в многофазном потоке смеси с выходными сигналами разработанного измерительного преобразователя.
6. Обоснование структурной схемы и создание новой ИИС контроля многофазных потоков продукции скважин, включая контроль примесей воды и песка; разработка структурных схем ИИС контроля режима работы скважин, отвечающих различным технологическим схемам обустройства и эксплуатации месторождений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей, который позволяет получать информацию о содержании примесей воды на основе вычисления среднеквадратического значения сигнала, вызванного ударным воздействием капель, а информацию о содержании примесей песка на основе формирования последовательности из пачек импульсов, в которых количество импульсов зависит от интенсивности ударного воздействия

песчинок.

2. На основе проведения и обработки результатов экспериментальных исследований определены информативные частотные полосы каналов регистрации примесей песка и воды измерительного преобразователя с использованием приёмов двухфакторного дисперсионного анализа.

3. Разработана новая методика проведения климатических испытаний, базирующаяся на статистически обоснованном анализе экспериментальных данных значительного объема, и проведены исследования термостабильности измерительного преобразователя в широком температурном диапазоне (от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$), отвечающем реальным жёстким климатическим условиям эксплуатации.

4. Исследованы зависимости выходных сигналов информационных каналов измерительного преобразователя от расхода газа и примесей в потоке смеси, и с использованием приемов регрессионного анализа обоснованы новые и удобные для практического применения информационные модели, функционально связывающие количество примесей песка и воды в потоке продукции со значениями выходных сигналов предложенного измерительного преобразователя; адекватность полученных моделей подтверждена в ходе лабораторных исследований и обработки большого объёма экспериментальных данных.

5. В результате проведённых исследований модифицирован спектрометрический метод измерения расхода фаз многофазных потоков, что позволило расширить его функциональные возможности при контроле примесей воды и песка.

6. Разработаны структурные схемы ИИС контроля многофазных потоков продукции скважин и основного измерительного модуля ИИС, включающего предложенный измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей; обоснованы структурные схемы ИИС контроля режима работы скважин, отвечающих различным технологическим схемам обустройства и эксплуатации месторождений.

Практическая значимость работы. Модифицированный спектрометрический метод, измерительный преобразователь каналов регистрации примесей и новые информационные модели для количественной оценки примесей использованы при создании ИИС контроля режима работы скважин нового поколения «Поток-6», отличающейся эффективностью работы при измерении расхода фаз потоков с высокими газовыми факторами. Существенными достоинствами ИИС являются возможность количественной оценки содержания примесей воды и песка в многофазном потоке смеси, а также её низкое энергопотребление (менее 1 Вт), что открывает перспективы её длительной эксплуатации на неэлектрифицированных скважинах в автономном режиме с батарейным питанием.

Разработанная ИИС доведена до серийного производства и внедрена на трёх скважинах Кшукского газоконденсатного месторождения и на шести скважинах Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения. ИИС сертифицирована для серийного выпуска по утвержденным техническим условиям в соответствии с требованиями Таможенного Союза для работы на взрывоопасных объектах.

Полученные унифицированные информационные модели удельного содержания примесей, содержащие всего один градуировочный коэффициент, удобны

для практического применения, так как существенно упрощают процедуру градуировки датчика по месту эксплуатации.

Разработанный измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей воды и песка реализован в устройстве для контроля расхода компонентов продукции скважин, оригинальность которого подтверждена патентом РФ №2654099 от 16.05.2018.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре Информационно-измерительных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина и используются при подготовке магистров направлений «Нефтегазовое дело», «Приборостроение» и «Управление в технических системах», а также в Центре инновационных компетенций РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина при повышении квалификации руководителей и специалистов топливно-энергетического комплекса по программе «Информационные технологии измерения и контроля в нефтегазовом комплексе».

Результаты диссертационной работы использовались в НИР по темам: «Анализ результатов специальных исследований модульных устройств и информационно-измерительных систем серии «Поток» (№ 525-01-14/102-15); «Анализ результатов специальных промысловых исследований информационно-измерительных систем серии «Поток» (№ 525-01-15/102-16, проведённые в 2016-2018 гг.).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач проведен большой объём экспериментальных исследований на специализированной лабораторной установке, позволяющей моделировать водовоздушные и песковоздушные потоки с различными регулируемыми соотношениями воздуха и примесей. В работе широко использовались методы математической статистики; методы планирования, проведения и анализа факторных экспериментов; приёмы регрессионного анализа. Статистический анализ данных выполнялся на ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ.

Положения, выносимые на защиту:

1 Модифицированный спектрометрический метод измерения расхода фаз многофазных потоков, позволяющий количественно оценивать содержание примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин в широких динамических диапазонах водосодержаний и содержаний песка, отвечающих реальным условиям эксплуатации.

2 Термостабильный измерительный преобразователь, обоснованные информативные частотные полосы измерительных каналов и унифицированные информационные модели, позволившие повысить точность контроля примесей с индикаторного режима до количественного учёта с приведёнными среднеквадратическими погрешностями (2 – 4) % по песку и (4 – 7) % по воде.

3 Структурные схемы ИИС контроля многофазных потоков продукции скважин и основного измерительного модуля ИИС, включающего предложенный измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей, а также структурные схемы ИИС контроля режима работы скважин, отвечающих различным технологическим схемам обустройства месторождений.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность выводов диссертационной работы подтверждается результатами большого объёма экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методов статистического анализа и теории планирования эксперимента; выполненной проверкой адекватности и пригодности разработанных информационных моделей удельного содержания примесей песка и воды; применением средств математического моделирования на ЭВМ с использованием пакета прикладных программ Matlab, а также использованием программного пакета Statistica для статистического и графического анализа данных.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных и всероссийских конференциях:

– Международные молодёжные научные конференции: 67-я конференция «Нефть и газ – 2013», Москва, 9-12 апреля 2013 г.; 71-я конференция «Нефть и газ – 2017», Москва, 18-20 апреля 2017 г.;

– Всероссийские научно-технические конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»: X конференция, Москва, 10-12 февраля 2014 г.; XI конференция, Москва, 8-10 февраля 2016 г.; XII конференция, Москва, 12-14 февраля 2018 г.;

– Всероссийские конференции молодых учёных, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности»: X конференция, Москва, 8-11 октября 2013 г.; XII конференция, Москва, 24-27 октября 2017 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 научных трудах, в том числе: в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России; в 8 тезисах и материалах международных и всероссийских конференций; получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 112 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 135 страницах основного текста и 19 страницах приложений. Основной текст работы содержит 73 рисунка и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе «Анализ методов и технических средств контроля параметров многофазных потоков продукции скважин» проведен обзор наиболее известных средств контроля параметров потоков продукции. Среди них многофазные расходомеры: MPM норвежской компании FMC Technologies, Phase Tester фирмы Schlumberger, MPFM-50 компании AGAR, расходомеры компании Pietro Fiorentini и наиболее яркие представители отечественных разработок – двухфазные расходомеры ДФР-01 конструкции ООО НПФ «Вымпел» и расходомеры серии РГЖ ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седатова». Исследованы датчики-сигнализаторы песка «SandQ» компании «Clampon», системы регистрации выноса твёрдых

фракций «Кадет» ООО «Объединение БИНАР» и акустические датчики-сигнализаторы песка ЗАО «Сигма-оптик». Особое внимание уделено ИИС серии «Поток», в основу работы которых положен спектрометрический метод измерения расхода фаз. В отличие от большинства известных многофазных расходомеров ИИС серии «Поток» оказываются эффективными как для измерения дебита основной продукции, так и для контроля примесей песка и воды в потоке продукции скважин с высокими газовыми факторами. На основе анализа выявленных преимуществ и недостатков известных ИИС сформулированы требования, предъявляемые к средствам измерения и контроля параметров многофазных потоков продукции скважин.

Вторая глава «Модификация спектрометрического метода измерения количества примесей в потоке продукции скважин» посвящена обоснованию необходимости модификации спектрометрического метода для решения задач контроля количества примесей воды и песка в потоке продукции скважин и её практической реализации. Спектрометрический метод измерения расхода фаз был разработан учеными РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина совместно со специалистами ООО «Газпром добыча Уренгой» и ПАО «Газпром», а перспективность его применения подтверждена положительными результатами многолетних исследований и длительной промысловой апробацией на газовых, газоконденсатных и нефтяных скважинах Уренгойского месторождения.

Суть спектрометрического метода состоит в использовании в качестве источника информации о расходе фаз в потоке спектральных характеристик флуктуаций (пульсаций) давления, возникающих при движении газожидкостной смеси (ГЖС) по трубопроводу с сужающим устройством (СУ). После СУ установлен датчик флуктуаций давления. Выступающая в поток часть датчика (первичный измерительный преобразователь - ИП) выполнена в виде полого металлического цилиндра, внутри которого закреплен пьезокерамический чувствительный элемент (ПЧЭ). Такой ИП позволяет регистрировать турбулентные флуктуации давления, связанные с расходом фаз основного потока продукции, а также регистрировать ударные воздействия частиц примесей о корпус выступающей в поток части датчика.

Для изучения и анализа процесса взаимодействия потоков газа с примесями с первичным ИП были проведены исследования на специализированной экспериментальной установке, создающей водо- и песковоздушные потоки со стабильными и регулируемыми соотношениями расхода воздуха и расхода примесей.

Результаты проведенных многочисленных исследований на экспериментальной установке показали, что сигналы ударных воздействий твёрдых частиц песка и капель воды, регистрируемые первичным ИП, существенно отличаются, и поэтому могут быть идентифицированы. Реакция ПЧЭ на удары мелкодисперсных капель воды, содержащихся в газовом потоке, представляет собой короткие ударные затухающие импульсы, имеющие широкополосный спектр в ультразвуковом диапазоне частот. При этом амплитуда и длительность таких импульсов зависят от массы частиц и скорости многофазного потока. Жидкость, проходя через сужение, разбивается на мелкие капли. В результате, сигналы ударов капель жидкости накладываются друг на друга (рисунок 1а). В таком смешанном сигнале сложно выделить отдельные затухающие импульсы, соответствующие ударам отдельных капель о

ПЧЭ. Однако по общей интенсивности сигнала и информации о расходе газа можно судить о количестве жидкости в потоке смеси.

Ударное воздействие песчинок о корпус первичного ИП проявляется иным образом. Ввиду их невысокой концентрации в потоке по сравнению с жидкостью, а также с учётом остроты кромок частиц песка наблюдаются более высокочастотные короткие ударные импульсы с большой скважностью (рисунок 1б). Спектр таких импульсов более широкополосный, поэтому в отличие от ударов капель жидкости, их воздействие проявляется и в более высокочастотном ультразвуковом диапазоне. Судить о количестве примесей песка по общей интенсивности сигнала сложно, так как значительная её доля будет обусловлена шумовой составляющей.

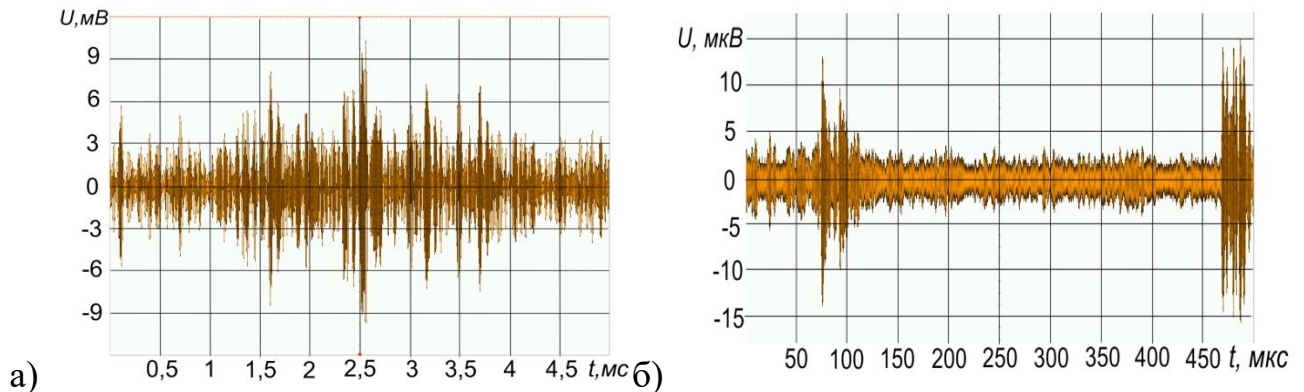


Рисунок 1 – Реакция чувствительного элемента на удары:

а) капля жидкости; б) песчинка

Учитывая особенности сигналов ударных воздействий, обоснована функциональная схема измерительного преобразователя каналов регистрации примесей (рисунок 2), который включает в себя два измерительных канала с различными схемами преобразования сигналов: канал регистрации удельного содержания примесей воды (УСПВ) и канал регистрации удельного содержания примесей песка (УСПП).

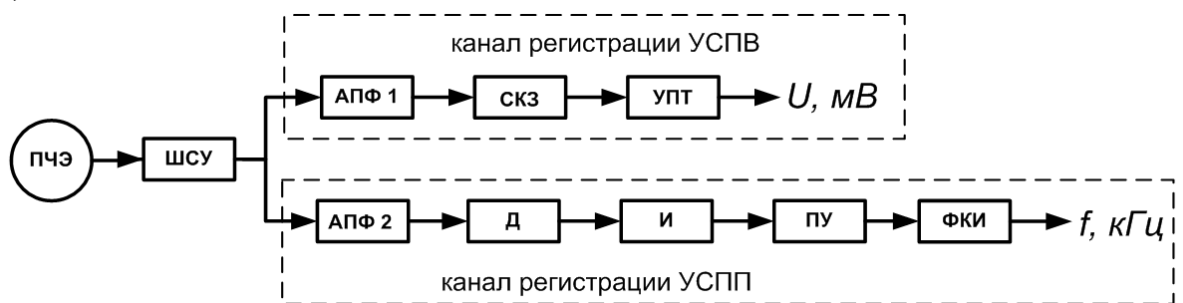


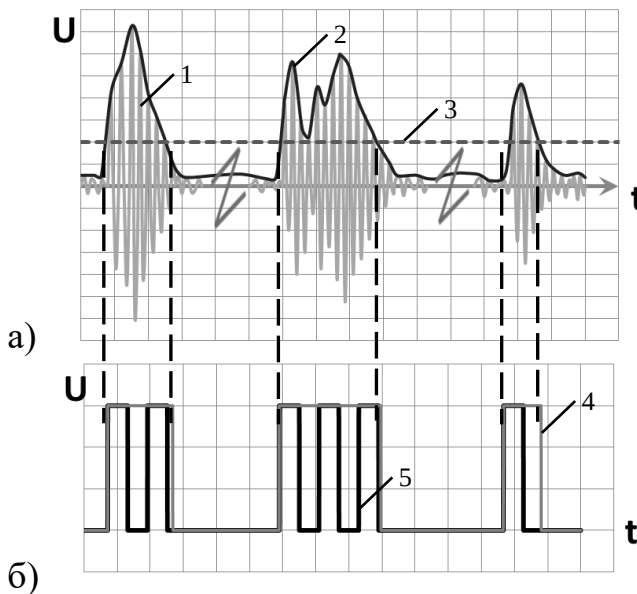
Рисунок 2 – Функциональная схема измерительного преобразователя информационных сигналов каналов регистрации примесей

ПЧЭ – пьезокерамический чувствительный элемент; ШСУ – широкополосный согласующий усилитель; АПФ1, АПФ2 – активные полосовые фильтры; СКЗ – вычислитель среднеквадратического значения сигнала; УПТ – усилитель постоянного тока; Д – детектор; И – интегратор; ПУ – пороговое устройство; ФКИ – формирователь квантованных импульсов.

Для получения информации о содержании примесей воды предложено вы-

числить среднеквадратическое значение сигнала ударного воздействия капель жидкости в соответствующей информативной полосе частот. А для получения информации о содержании примесей песка – использовать специальный функциональный преобразователь, позволяющий формировать на выходе канала регистрации УСПП пачки импульсов, количество импульсов в которых пропорционально интенсивности сигнала отдельного ударного воздействия. Тогда частота импульсной последовательности будет пропорциональна интенсивности ударов песчинок.

На рисунке 3 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие процедуры формирования информационного сигнала канала измерения УСПП.



Отфильтрованный высокочастотный информационный сигнал ударного воздействия частиц примесей песка (1) и формирование его огибающей (2) с помощью детектора и интегратора; уровень ПУ (3)

Формирование разрешающих импульсов для ФКИ (4) и их заполнение импульсами прямоугольной формы заданных амплитуды, длительности и скважности (5)

Рисунок 3 – Формирование импульсов в канале регистрации УСПП

Особое внимание при разработке измерительного преобразователя уделялось частотному разделению сигналов ударного воздействия частиц примесей песка и капель воды, а именно – выбору рабочих диапазонов частот АПФ1 и АПФ2. Для этого были проанализированы спектры выходных сигналов первичного ИП, полученные в ходе исследований на экспериментальной установке при проведении полностью рандомизированного факторного эксперимента. По результатам обработки экспериментальных данных с применением дисперсионного анализа было установлено, что частотная область 70-100 кГц является наиболее предпочтительной для канала УСПВ, а полоса частот 1,6-1,8 МГц – для канала регистрации УСПП. Правомочность применения методов факторного эксперимента была подтверждена предварительной проверкой однородности дисперсий с использованием критерия Кохрена при 5% уровне значимости.

В работе проведены специальные исследования воспроизводимости выходных сигналов измерительного преобразователя при экстремальных температурных воздействиях, а именно при воздействии «термоудара» (резкого изменения температуры окружающей среды от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Методика проведения климатических испытаний заключалась в следующем. На экспериментальной лабораторной установке задавали стационарные потоки водовоздушной или песковоздушной

смеси (по два режимных уровня расхода воздуха и примесей) и регистрировали выходные сигналы соответствующих информационных каналов. На каждом режимном уровне выполняли по десять повторных опытов. Такие серии экспериментов повторяли с периодом в несколько дней. Далее выполнялся «термоудар» и снова проводили серии экспериментов по десять опытов на каждом режимном уровне расхода воздуха с примесями, повторяя их с периодом в несколько дней.

По полученным данным рассчитывали средние значения сигнала для каждой серии опытов. Динамика изменения средних значений во времени для каналов регистрации УСПП и УСПВ отражена на рисунках 4 и 5, соответственно.

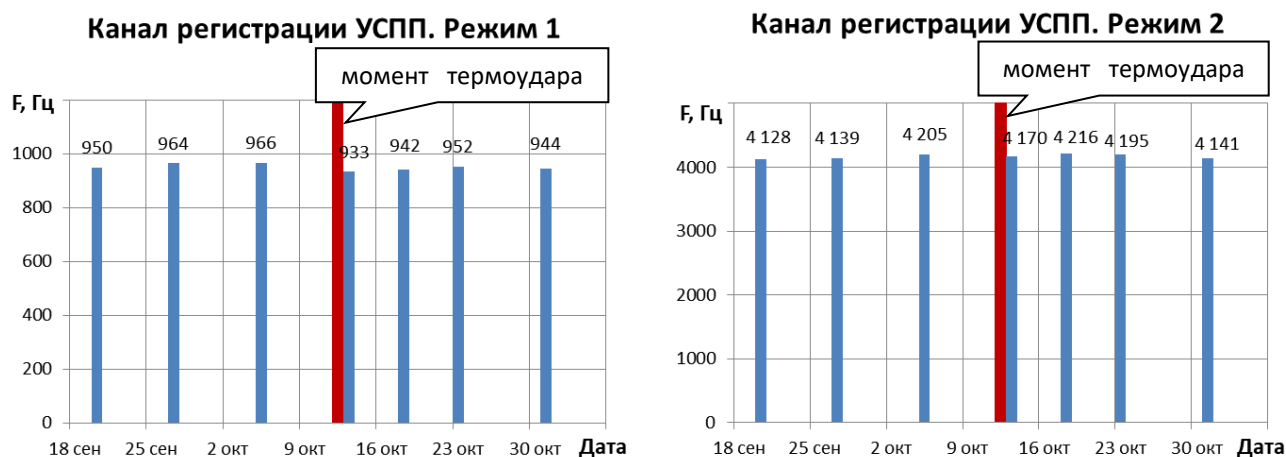


Рисунок 4 – Изменение средних значений для канала регистрации УСПП

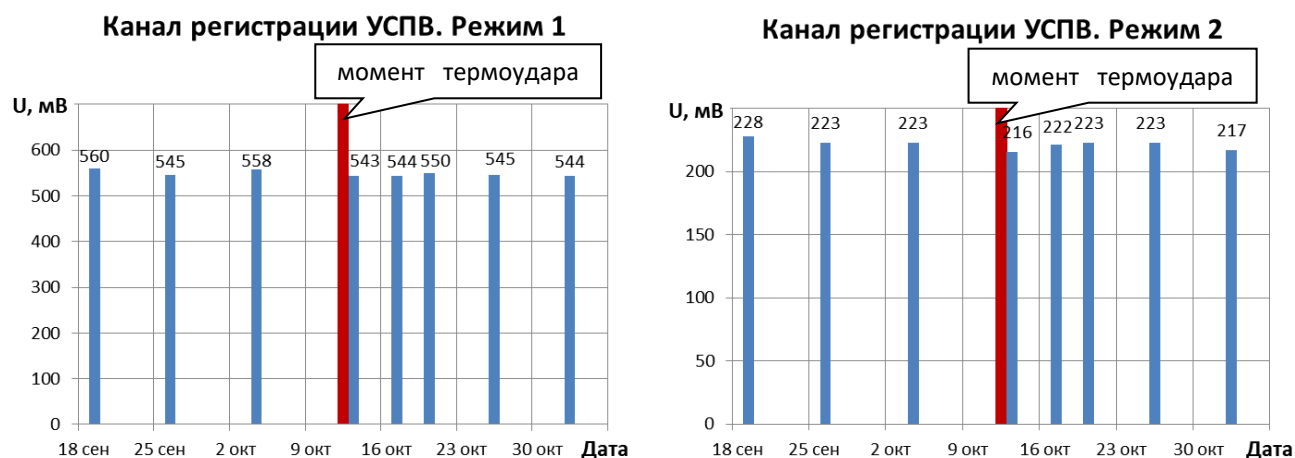


Рисунок 5 – Изменение средних значений для канала регистрации УСПВ

Чтобы установить, значительно ли отличие среднего значения какого-либо ряда измерений от средних значений других рядов измерений, использовался критерий Диксона. Гипотеза о равенстве средних полученных выборок для каждого из режимов для обоих каналов регистрации примесей была подтверждена при 5% уровне значимости. Правомерность применения критерия Диксона и справедливость принятия гипотезы в каждом рассматриваемом случае подтверждена результатами предварительно проведенных экспериментальных исследований, свидетельствующих о нормальности закона распределения выходных сигналов информационных каналов (использовался критерий согласия Пирсона при 5% уровне значимости), а также об однородности дисперсий в каждой серии из десяти опытов (использовали

критерий Кохрена при 5% уровне значимости).

Проведенный комплекс климатических исследований подтвердил устойчивость измерительных каналов регистрации примесей к неблагоприятным внешним температурным воздействиям.

Третья глава «Информационные модели каналов регистрации примесей» посвящена разработке и исследованию моделей, функционально связывающих количество примесей песка и воды в газовом потоке продукции с соответствующими выходными сигналами разработанного ИП. Для установления вида функциональных зависимостей проведены эксперименты на специализированной лабораторной установке, создающей воздушные потоки с примесями.

По результатам экспериментальных данных исследованы зависимости:

- для канала регистрации УСПП – зависимости частоты f на выходе канала регистрации УСПП от расхода песка Q_{II} в потоке при различных постоянных расходах газа $Q_{Г}$ (рисунок 6а);
- для канала измерения УСПВ – зависимости напряжения U на выходе канала регистрации УСПВ от расхода примесей воды $Q_{В}$ в потоке при различных постоянных расходах газа $Q_{Г}$ (рисунок 6б).

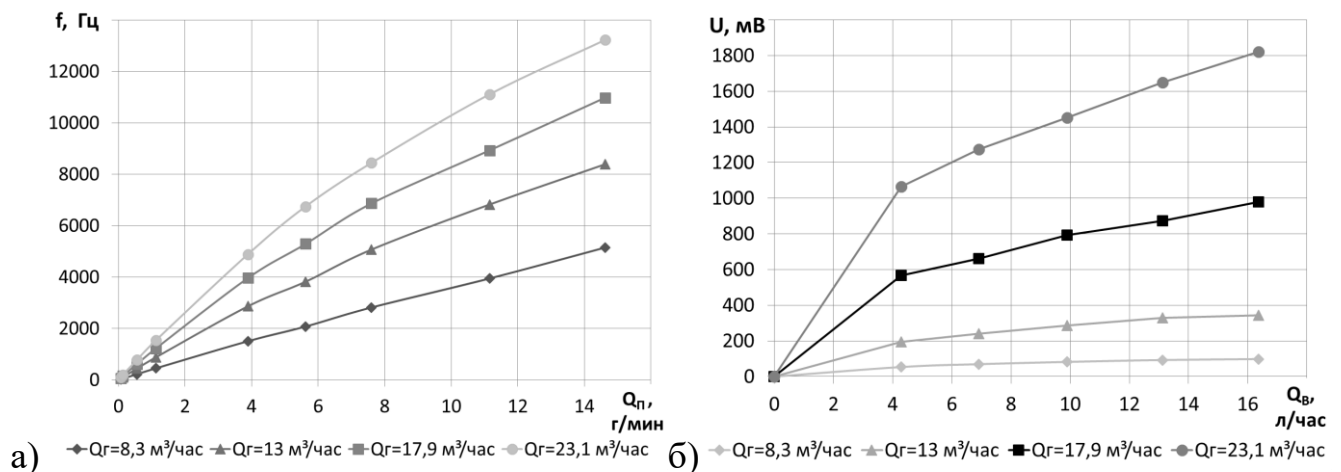


Рисунок 6 – Зависимости выходных сигналов каналов регистрации примесей от расходных характеристик потока

а) семейство характеристик $f(Q_{II})$ при $Q_{Г} = const$;

б) семейство характеристик $U(Q_{В})$ при $Q_{Г} = const$

Для обработки экспериментальных данных использованы приёмы регрессионного анализа. Предварительно проведены исследования, направленные на проверку выполнимости основных положений теории регрессионного анализа (нормальности закона распределения и однородности дисперсий).

На основе детального анализа всей совокупности экспериментальных данных, представленных на рисунках 6а и 6б, были предложены информационные модели каналов регистрации примесей песка (1) и воды (2):

$$f = k_{II}(Q_{Г}) \cdot Q_{II}^b, \quad (1)$$

$$U = k_{В}(Q_{Г}) \cdot Q_{В}^c, \quad (2)$$

где $k_{II}(Q_{Г})$ и $k_{В}(Q_{Г})$ – функциональные коэффициенты, зависящие от расхода газа; b и c – постоянные коэффициенты.

Исследования показали, что функциональные коэффициенты $k_{\Pi}(Q_{\Gamma})$ и $k_B(Q_{\Gamma})$ наилучшим образом описываются степенными моделями следующего вида:

$$k_{\Pi}(Q_{\Gamma}) = \alpha_{\Pi} \cdot Q_{\Gamma}^{\beta_{\Pi}}, \quad (3)$$

$$k_B(Q_{\Gamma}) = \alpha_B \cdot Q_{\Gamma}^{\beta_B}, \quad (4)$$

где α_{Π} , α_B , β_{Π} и β_B – постоянные коэффициенты.

В результате информационные модели каналов регистрации примесей приводятся к виду:

$$f = a_1 \cdot Q_{\Gamma}^{b_1} \cdot Q_{\Pi}^{c_1}, \quad (5)$$

$$U = a_2 \cdot Q_{\Gamma}^{b_2} \cdot Q_B^{c_2}, \quad (6)$$

где a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 и c_2 – постоянные коэффициенты.

Для количественной оценки примесей в именованных единицах введены понятия удельного содержания примесей песка S_{Π} , определяемого как отношение Q_{Π}/Q_{Γ} , и удельного содержания примесей воды S_B , определяемого как отношение Q_B/Q_{Γ} . Заменяя расходы примесей в уравнениях (5) и (6) на соответствующие удельные содержания примесей и решая их относительно S_{Π} и S_B , получим информационные модели удельного содержания примесей песка (7) и воды (8), которые описывают связь концентрации примесей в потоке с выходными сигналами измерительных каналов и расходом газа:

$$S_{\Pi} = a_3 \cdot f^{b_3} / Q_{\Gamma}^{c_3}, \quad (7)$$

$$S_B = a_4 \cdot U^{b_4} / Q_{\Gamma}^{c_4}, \quad (8)$$

где a_3 , a_4 , b_3 , b_4 , c_3 и c_4 – постоянные коэффициенты.

Для оценки точности предложенных регрессионных моделей (7) и (8) рассчитаны соответствующие коэффициенты множественной корреляции R :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (9)$$

где y_i – фактическое значение; $\hat{y}_i$ – значение, полученное по модели; $\bar{y}$ – среднее значение для фактических значений; n – количество измерений.

Величина $\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ представляет собой «необъяснённую» дисперсию, т.е. долю общей дисперсии, которая не объясняется функцией регрессии, а возникает за счёт изменчивости неучтенных факторов или за счет случайностей.

Результаты расчёта неизвестных коэффициентов регрессионных моделей (7) и (8) и соответствующие значения коэффициентов множественной корреляции R , полученные в ходе исследования десяти идентичных измерительных преобразователей, впоследствии названных скважинными измерительными модулями (СИМ), отражены в таблице 1. Как видно из таблицы, коэффициенты множественной корреляции для всех исследованных СИМ близки к единице, что свидетельствует о высокой степени пригодности модели.

Кроме того, из таблицы видно, что расчётные значения коэффициентов b_3 , коэффициентов c_3 модели (7), а также коэффициентов b_4 , коэффициентов c_4 модели (8) для различных СИМ мало отличаются. Следовательно, их можно зафиксировать ($b_3 = 1,1$; $c_3 = 2,2$; $b_4 = 2,2$; $c_4 = 7,5$). Тогда в информационных моделях удельного

содержания примесей песка и воды останется всего по одному неизвестному коэффициенту a_3 и a_4 , соответственно.

Таблица 1 – Результаты расчёта коэффициентов регрессионных моделей (7) и (8) и соответствующих коэффициентов множественной корреляции R

№ СИМ	Канал регистрации УСПП				Канал регистрации УСПВ			
	Коэффициенты регрессионной модели (7)			R	Коэффициенты регрессионной модели (8)			R
	a_3	b_3	c_3		a_4	b_4	c_4	
1	0,77	1,15	2,302	0,9964	494,82	2,24	7,50	0,9879
2	1,02	1,12	2,32	0,9958	551,85	2,24	7,51	0,9899
3	0,82	1,13	2,27	0,9967	707,37	2,24	7,55	0,9687
4	0,43	1,16	2,14	0,9974	907,48	2,01	7,15	0,9822
5	1,12	1,15	2,43	0,9945	601,52	2,10	7,21	0,9895
6	0,95	1,12	2,32	0,9949	1105,93	2,10	7,43	0,9850
7	1,05	1,10	2,29	0,9961	835,11	2,09	7,31	0,9886
8	1,98	1,08	2,43	0,9940	1084,69	2,42	8,07	0,9699
9	0,33	1,18	2,10	0,9988	923,04	2,18	7,50	0,9860
10	1,00	1,12	2,39	0,9955	509,24	2,10	7,13	0,9874

Таким образом, получены удобные для практического применения унифицированные информационные модели удельного содержания примесей, содержащие всего по одному градуировочному коэффициенту. Это позволяет упростить процедуру градуировки датчика по месту эксплуатации. Для унифицированных моделей выполнена проверка адекватности, в ходе которой сравнивалась дисперсия адекватности с дисперсией воспроизводимости с помощью критерия Фишера. Результаты проверки оказались положительными при 5% уровне значимости.

Примеры применения унифицированных моделей для одного из СИМ отражены на рисунках 7а и 7б. Приведённые среднеквадратические погрешности (γ_σ) вычисления удельного содержания примесей для выбранного СИМ составили по воде 4,21% (в динамическом диапазоне водосодержаний от 0,2 до 2 л/м³), а по песку 2,19% (в динамическом диапазоне концентраций песка от 0,005 до 110 г/м³).

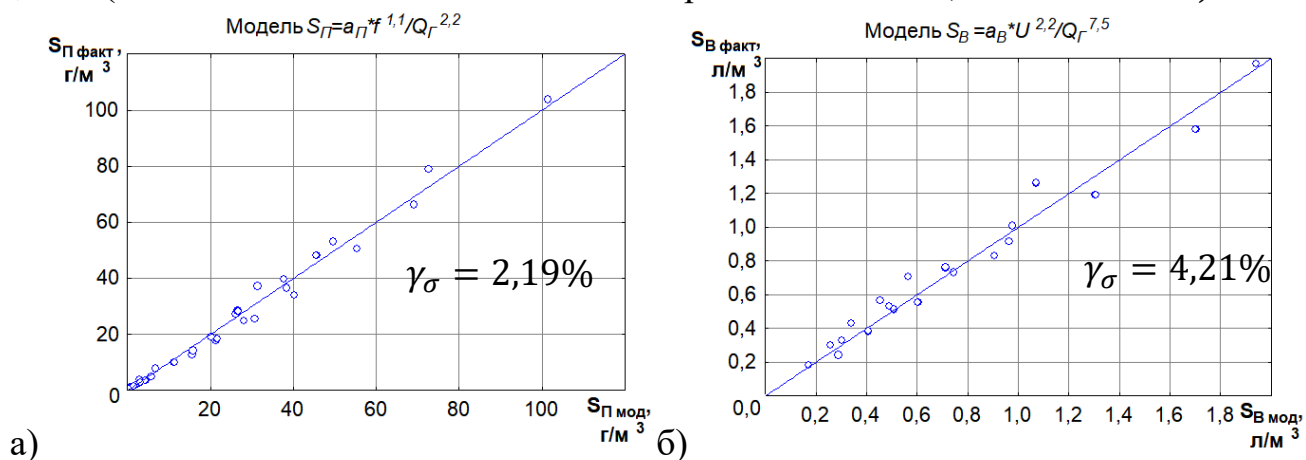


Рисунок 7 – Зависимости фактического содержания примесей ($S_{\text{факт}}$) от содержания примесей, рассчитанного по унифицированным моделям ($S_{\text{мод}}$)

а) для канала регистрации УСПП, б) для канала регистрации УСПВ

Подобные результаты применения унифицированных моделей получены при

исследовании десяти различных СИМ (таблица 2). Это свидетельствует о приемлемой точности вычисления содержания примесей в широком динамическом диапазоне, удовлетворяющей требованиям технологического контроля.

Таблица 2 – Приведённые среднеквадратические погрешности γ_σ вычисления удельного содержания примесей для контрольной партии СИМ

№ СИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_σ для канала регистрации УСПП, %	2,19	2,45	2,05	2,24	3,16	2,63	2,36	3,79	2,33	2,89
γ_σ для канала регистрации УСПВ, %	4,21	3,73	5,93	5,91	3,47	6,72	4,24	5,99	4,06	3,91

Четвертая глава «Информационно-измерительная система контроля параметров многофазных потоков продукции скважин» посвящена описанию разработанной ИИС «Поток-6», предназначенной для оперативного комплексного контроля режима работы скважин, характеризующихся высокими газовыми факторами (объём газовой фракции при рабочих термобарических условиях – 90...100%). Система отличается от предыдущих значительно меньшим энергопотреблением (менее 1 Вт), гибкой модульной архитектурой для использования на различных типах скважин с различными уровнями обустройства, а также возможностью количественного измерения содержания примесей в потоке.

Обобщенная структурная схема ИИС представлена на рисунке 8. Главным элементом в ИИС является скважинный измерительный модуль (СИМ), стационарно устанавливаемый на выкидной линии скважины на определённом расстоянии после СУ. СИМ состоит из первичного ИП с ПЧЭ и электронных измерительных преобразователей информационных каналов.

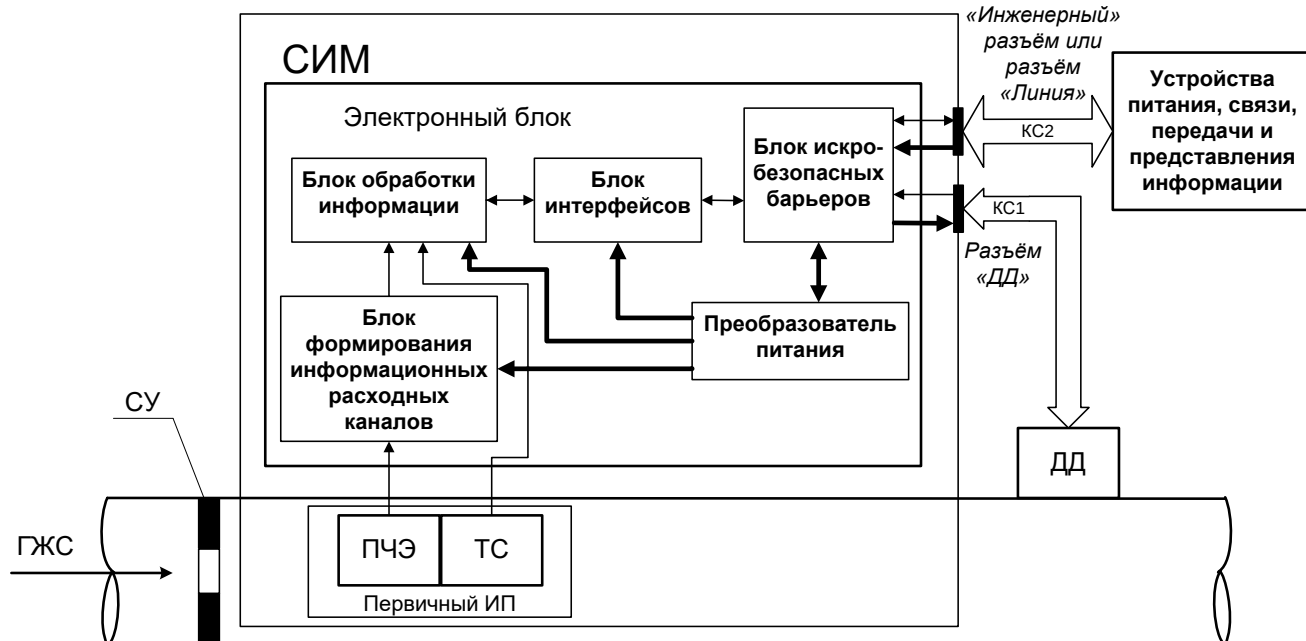


Рисунок 8 – Обобщённая структурная схема ИИС контроля параметров потока продукции нефтегазоконденсатных скважин

Для измерения температуры контролируемого потока в первичном ИП размещено термосопротивление (ТС), сигнал с которого поступает в блок обработки информации. Давление контролируется с помощью внешнего датчика давления (ДД) с цифровым выходом, подключаемого к СИМ с помощью специализированного кабеля (КС1).

Результаты измерения контролируемых параметров могут быть считаны внешними устройствами, подключаемыми с помощью универсального хладостойкого кабеля связи на транспортной катушке (КС2) к «Инженерному» разъёму СИМ или к разъёму «Линия» в зависимости от целей исследований. Обмен информацией между системой «Поток-6» и внешними устройствами связи осуществляется по кабельным линиям связи по протоколу Modbus RTU (интерфейс RS-485). Питание скважинной части ИИС поступает от внешнего источника по выделенной паре проводов. Питание внутренних блоков СИМ и ДД формируется специализированным преобразователем, расположенным внутри СИМ.

В диссертации дано подробное описание ИИС и её основных блоков, приведена структурная схема СИМ и схемы обустройства скважин ИИС «Поток-6».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

1 Выполнен обзор литературных источников в области информационно-измерительных систем нефтегазовой отрасли и расходомерии многофазных потоков продукции скважин. Сделан вывод о том, что подавляющее большинство существующих многофазных расходомеров отличаются низкой эффективностью работы при измерении расхода фаз потоков с высокими газовыми факторами. Показано, что перспективными для измерения таких потоков, в том числе для контроля примесей воды и песка, представляются расходомеры, построенные на основе спектрометрического метода, позволяющего вычислять расходы фаз по спектральным характеристикам флуктуационного процесса в многофазном потоке, регистрируемого датчиком с пьезокерамическим преобразователем.

2 В результате проведённых исследований модифицирован спектрометрический метод измерения расхода многофазных потоков, что позволило расширить его функциональные возможности при контроле примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин в широких динамических диапазонах водосодержаний и содержания песка, отвечающих реальным промышленным условиям.

3 Разработан новый измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей, учитывающий особенности ударных воздействий частиц песка и капель жидкости. Оригинальность предложенного измерительного преобразователя подтверждена патентом РФ № 2654099 от 16.05.2018.

4 Разработана новая методика проведения климатических испытаний, базирующаяся на статистически обоснованном анализе экспериментальных данных значительного объема, и подтверждена термостабильность измерительного преобразователя в широком температурном диапазоне (от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$), отвечающем реальным жёстким климатическим условиям эксплуатации.

5 Проведены исследования на специализированной экспериментальной установке, создающей водо- и песковоздушные потоки, и определены информативные

частотные полосы каналов регистрации примесей песка и воды. Получены новые, удобные для практического применения, информационные модели, функционально связывающие количество примесей песка и воды в многофазном потоке смеси с выходными сигналами разработанного оригинального измерительного преобразователя. Применение этих моделей позволяет повысить точность контроля примесей с индикаторного режима до количественного учёта с приведёнными среднеквадратическими погрешностями (2 – 4) % по песку и (4 – 7) % по воде.

6 Разработаны структурные схемы новой ИИС контроля многофазных потоков продукции скважин и основного измерительного модуля системы, включающего предложенный измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей. Разработаны структурные схемы ИИС контроля режима работы скважин, отвечающих различным технологическим схемам эксплуатации месторождений. Разработаны технологические схемы обустройства куста электрифицированных и неэлектрифицированных скважин новыми ИИС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ:

1. Великанов, Д. Н. Контроль содержания капельной жидкости в составе продукции эксплуатационных скважин / Д. Н. Великанов, И. Ю. Храбров, **Я. Д. Зыкова** // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2013. – №3/272. – С. 78–90.
2. Ермолкин, О. В. Комплексный контроль параметров продукции эксплуатационных скважин / О. В. Ермолкин, Д. Н. Великанов, М. А. Гавшин, **Я. Д. Попова** // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2017. – №4. – С. 12–19.
3. **Попова, Я. Д.** Разработка и исследование информационных моделей расхода примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Нефть, газ, бизнес. – 2017. – №11. – С. 9–16.
4. Ермолкин, О. В. Разработка и исследование электронных преобразователей каналов регистрации примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин / О. В. Ермолкин, **Я. Д. Попова**, А. В. Горохов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2018. – №3. – С. 18–23.
5. Ермолкин, О. В. Информационно-измерительная система оперативного контроля многофазных потоков продукции скважин / О. В. Ермолкин, М. А. Гавшин, **Я. Д. Попова**, А. Н. Лотош // Приборы. – 2018. – №7. – С. 13–20.
6. Ермолкин, О. В. Контроль параметров сложных потоков продукции эксплуатационных скважин измерительной системой «Поток» нового поколения / О. В. Ермолкин, Д. Н. Великанов, **Я. Д. Попова**, И. Ю. Храбров // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2018. – №3/288. – С. 195–207.

Патент РФ:

7. Пат. 2654099 Российская Федерация, МПК Е 21 В 47/10. Устройство для контроля расхода компонентов продукции скважин / Ермолкин О.В. Великанов Д.Н., **Попова Я.Д.**, Гавшин М.А., Храбров И.Ю., Лотош А.Н., Шитиков А.Е., Мартынов Д.В., Горохов А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Российский госу-

дарственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина». — № 2017121806/03 ; заявл. 21.06.2017; опубл. 16.05.2018, Бюл. №14.

Материалы конференций и статьи:

8. **Зыкова, Я. Д.** Решение задачи контроля примесей в многофазном потоке продукции газовых скважин // Тезисы докладов X Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика). – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – С. 185.

9. **Зыкова, Я. Д.** Исследование метода регистрации количества жидких примесей в многофазном потоке продукции газовых скважин // Тезисы докладов 67-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2013». Том 1. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – С. 204.

10. **Зыкова, Я. Д.** Контроль содержания примесей в продукции эксплуатационных скважин / **Я. Д. Зыкова, О. В. Ермолин, Д. Н. Великанов** // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Материалы X Всероссийской научно-технической конференции. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. – С. 269.

11. Храбров, И.Ю. Анализ эффективности применения современных систем измерения расхода многофазных потоков на газоконденсатных скважинах / И. Ю. Храбров, О. В. Ермолин, Д. Н. Великанов, **Я. Д. Попова** // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Тезисы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. – С. 355.

12. **Попова, Я. Д.** Определение количества примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин / Тезисы докладов 71-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2017». Том 3. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 53.

13. **Попова, Я. Д.** Определение количества примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин / **Я. Д. Попова, О. В. Ермолин** // Сборник трудов 71-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ 2017». – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 283-292.

14. **Попова, Я. Д.** Разработка информационных моделей каналов регистрации примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика): Материалы XII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 284.

15. **Попова, Я. Д.** Разработка электронных преобразователей каналов регистрации примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Тезисы докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. – С. 388.

ПОПОВА Янина Дмитриевна

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ ПРОДУКЦИИ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОГО СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук