

На правах рукописи



ПЕРМЯКОВ Виктор Сергеевич

**МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ
ЗА ОБВОДНЕНИЕМ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ
СКВАЖИН ПО НЕПРЕРЫВНОМУ ИЗМЕРЕНИЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОПУТНОЙ
ЖИДКОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕГО И
НИЖНЕГО МЕЛА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Ельцов Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, директор ИНГГ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Филатов Владимир Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры инженерной математики, (г. Новосибирск);

Ульянов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ООО «Новосибирский научно-технический центр», генеральный директор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Тюменский индустриальный университет**».

Защита состоится 7 апреля 2022 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02 (Д 003.068.03) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3;

факс (8-383) 330-28-07;

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/permiakov2021>

Автореферат разослан 11 февраля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331639



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – способы контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин на предмет повышения оперативности и качества диагностики попутной воды за счёт непрерывного измерения физико-химических параметров попутной жидкости непосредственно в точке отбора проб электрометрическими методами.

Актуальность исследования. Как известно, появление воды любого типа в интервале перфорации газовых и газоконденсатных скважин способствует разрушению прискважинной зоны пласта (Гасумов, Минликаев, 2013), снижению продуктивности скважин (Ли и др., 2008) и другим нежелательным последствиям. Своевременное обнаружение обводнения скважин и диагностирование типа воды позволяет подобрать необходимые геолого-технические мероприятия (ГТМ) для восстановления продуктивности скважины, безопасной её эксплуатации, а также определения эффективности проведённых ГТМ. Но известные способы контроля за обводнением скважин затратные и не позволяют охватить исследованиями весь фонд скважин и одновременно организовать их онлайн мониторинг. Геофизические полевые (4D сейсмика, гравиметрия) и скважинные исследования (нейтронный каротаж, дивергентный и др.) технически сложны, трудоёмки и экономически затратные, что не позволяет их использовать как оперативные методы контроля. Современный способ контроля за обводнением скважин – гидрохимический контроль - значительно дешевле геофизических методов, но также не лишён недостатков: низкая частота исследований, так как интенсификация контроля возможна только за счёт увеличения количества отбираемых проб, а следовательно, пропорционального увеличения трудовых и материальных затрат, что невозможно по технико-экономическим причинам; длительная доставка проб в лабораторию снижает достоверность диагностики из-за изменения их ионного состава (СТО Газпром 6-2005, 2005; СТО Газпром добыча Надым 5.056-2019, 2019); кроме того, контроль за обводнением скважин не автоматизирован - используются устаревшие способы ручного отбора проб и определения физико-химических параметров попутной воды.

Отсюда острая необходимость в разработке оперативных способов отбора проб попутной воды, определения её физико-химических параметров за счёт использования современных измерительных приборов, интегрированных в систему телеметрии месторождения, и совершенствования способа диагностики по результатам непрерывных измерений, в частности электрофизических параметров, с минимизацией «человеческого фактора».

Цель исследования – повысить оперативность и качество контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин без потери информативности за счёт существенного сокращения времени между отбором пробы попутной воды и получением её генетического профиля по результатам онлайн измерения электрофизических параметров попутной жидкости.

Научно-техническая задача - разработать методику оперативного онлайн контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин с использованием измерений электрофизических параметров попутной жидкости в газожидкостном потоке и диагностики попутной воды по этим параметрам. Задача решается поэтапно:

1. Анализ результатов экспериментальных измерений электрофизических параметров попутной воды методами диэлькометрии, ЯМР-релаксометрии, потенциометрии и кондуктометрии на предмет их применения для диагностики генезиса попутной воды.

2. Разработка и экспериментальное исследование способа непрерывного отбора проб жидкости из газожидкостного потока и измерения её электрического сопротивления с использованием резистивного датчика (разработка А. К. Манштейна, ИНГГ СО РАН), расположенного в углублении на нижней образующей горизонтального трубопровода.

3. Разработка способа диагностики попутной воды по электрофизическим параметрам попутной воды и его верификация путём сравнения с диагностикой по результатам классического гидрохимического анализа. Повышение точности диагностики за счёт уточнения ионного состава и диагностических признаков конденсационной и пластовой воды по результатам переобработки

материалов гидрохимических исследований попутной воды и её диагностики за 2014-2016 гг. по данным ООО "Газпром добыча Надым".

4. Апробация методики оперативного контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин в промысловых условиях (на примере месторождений ООО "Газпром добыча Надым").

Фактический материал, методы исследования, аппаратура.

Основные методы исследования - эксперименты по измерению параметров реальных и модельных проб попутной воды методами диэлектрической (Dielectric and radio-frequency..., 2017), ЯМР-релаксометрии (Шумская и др., 2017), кондуктометрии и потенциометрии (Пермяков, 2017), исследование работы резистивного датчика в статических и динамических условиях на стенде, имитирующем газожидкостный поток; сравнительный и сопоставительный анализ результатов измерения электрофизических параметров и результатов гидрохимического анализа попутной воды с долевым содержанием в ней конденсационной, пластовой и техногенной воды, рассчитанным по методике Института проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН) (Рекомендации для определения..., 2013; Абукова и др., 2015). Численными расчётами оценена точность результатов диагностики генезиса разными способами (по минерализации и априорным данным о закачке технических растворов, графоаналитическим способом, с использованием формулы Ахундова) путём сравнения заданных генетических профилей с расчётными, полученными по результатам диагностики по ионному составу, рассчитанному по заданным пропорциям смешивания разных типов воды, в идеальных условиях и с учётом влияния погрешности измерений физико-химических параметров. Статистическим анализом более 35000 результатов диагностики генезиса попутной воды, выполненной по методике ИПНГ РАН, установлена частота встречаемости проб с разным генетическим профилем в скважинах на отложения нижнего и верхнего мела Западной Сибири (на примере месторождений ООО "Газпром добыча Надым").

Высокая степень достоверности полученных результатов обеспечивается:

1. Представительностью исходных данных, их надёжностью: анализируется 68 проб попутной воды, отобранной из скважин ООО "Газпром добыча Надым", более 100 моделей проб, полученных смешиванием в различных пропорциях водных растворов солей, соответствующих конденсационной, пластовой и техногенной воде и более 35000 результатов гидрохимического анализа и диагностики генезиса попутной воды по методике ИПНГ РАН (по данным ООО "Газпром добыча Надым" за 2009-2019 гг.);

2. Использованием современных цифровых сертифицированных приборов: измерителя RLC E7-22, кондуктометров Cond315i, Cond3110, ЯМР-релаксометр «МСТ-05», иономер Эксперт-001-3.0.1 и ионоселективных электродов, проточного резистивного датчика (ИНГГ СО РАН);

3. Гидрохимическим, численным и сравнительным анализом;

4. Внедрением на производстве методики оперативного непрерывного контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин с использованием измерений электрического сопротивления попутной жидкости в газожидкостном потоке резистивным датчиком (Акт внедрения ООО "Газпром добыча Надым" от 01.12.2020).

Защищаемый научный результат - методика оперативного непрерывного контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин, основанная на:

– измерении электрического сопротивления и температуры жидкости в газожидкостном потоке, позволяющая определять удельную электрическую проводимость, минерализацию и диагностировать генетический профиль попутной воды не содержащей техногенных растворов;

– применении резистивного датчика, расположенного в углублении на нижней образующей горизонтального трубопровода, в том числе при объёмной доле механических примесей в попутной жидкости до 10% и жидких углеводородов до 72%.

Научная новизна

1. Впервые применён метод непрерывного определения генетического профиля попутной воды в газожидкостном потоке обвязки газовых и газоконденсатных скважин.

2. Экспериментально определены технические условия применения резистивного датчика и пробоуловителя: заглубление датчика на нижней образующей горизонтального трубопровода – не менее 8 мм; объёмная доля жидких углеводородов в попутной жидкости – менее 72 %, механических примесей, представленных кварцевым песком – менее 10%; при безразмерной скорости газа более 0,0007 перед датчиком необходимо устанавливать осевой завихритель.

3. Разработана методика оперативного онлайн контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин.

Личный вклад

1. Предложено для контроля состава попутной воды газовых скважин использовать электрофизические параметры.

2. Выполнен анализ применимости электрофизических параметров попутной воды и способов их измерения для поточного применения в обвязке скважины (экспериментальные измерения выполнены в соавторстве: диэлькометрия - Романов А.Н., ЯМР-релаксометрия – Шумскайте М.Й., потенциометрия и кондуктометрия – Еделев А.В., Саева О.П.).

3. Выполнены лабораторные и полевые эксперименты с поточным резистивным датчиком (в соавторстве с Манштейном А.К., Власовым А.А.);

4. Разработаны способы диагностики попутной воды и установлены условия их применимости:

- по минерализации пробы и априорным данным о применении техногенной воды в скважине;
- по ионному составу с применением формулы Ахундова;
- графоаналитический способ (в соавторстве с Манзыревым Д.В. и др., Патенты № 2710652, № 2711024).

5. Разработана методика оперативного контроля обводнения газовых и газоконденсатных скважин с использованием измерений электрического сопротивления попутной жидкости в газожидкостном потоке.

6. При непосредственном участии автора диссертации внедрена на производстве методика оперативного контроля обводнения газовых скважин на Медвежьем месторождении.

7. Предложен способ снижения затрат при внедрении методики за счёт укрупнения объектов контроля. Оценён технологический и экономический эффект от внедрения методики непрерывного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин.

8. Соискатель принимал участие в постановке задачи, обсуждении и подготовке большей части публикаций по теме диссертации.

Практическая значимость разработанной методики заключается в получении современного, значительно более точного и экономически выгодного инструмента для непрерывного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин по измерениям электрического сопротивления попутной жидкости и оперативной диагностики её генезиса по минерализации и априорным данным о закачке технических растворов. Методика может быть внедрена на любых газовых и газоконденсатных месторождениях при условии, что объёмная доля жидких углеводородов в жидкой фазе потока в точке измерений менее 72%, а механических примесей, представленных кварцевым песком, не более 10%.

Технологический эффект заключается в переходе от дискретных измерений (несколько раз в год) до постоянного онлайн мониторинга, что позволяет решить задачу комплексной автоматизации контроля за разработкой месторождения. Управленческий эффект заключается в выявлении ранних этапов обводнения скважин, что позволяет своевременно выполнять геолого-технические мероприятия, повышать безопасность эксплуатации скважин, снизить риски неконтролируемого выхода скважин из эксплуатационного фонда и потерь добычи газа. Экономический эффект заключается в снижении простоев скважин и минимизации потерь в добыче газа, за счёт их своевременного вывода в ремонт; а также снижении материальных и трудовых затрат за счёт сокращения ручного отбора проб, их транспортировки и лабораторного анализа.

Материалы диссертации изложены в 9 публикациях, из которых 3 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий РФ и международные базы цитирования Web of Science, Scopus, GeoRef («Геология и геофизика», «Известия

Томского политехнического института. Инжиниринг георесурсов»), GeoRef («Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений»), 2 патента РФ, 4 – материалы конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения; трёх глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 172 страницы, включая 19 таблиц, 76 рисунков и схем. Список использованной литературы содержит 148 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность С. Б. Бортниковой за начальный толчок к написанию диссертации; научному руководителю И. Н. Ельцову за постановку задач, помощь в разрешении сложных вопросов; Н. В. Юркевич за консультации по гидрохимическим аспектам; А. К. Манштейну за конструктивное обсуждение конструкции датчиков и постановку экспериментов; Д. В. Манзыреву, О. П. Саевой, А. В. Еделеу, Ю. Г. Карину, Н. А. Голикову, А. Н. Романову, М. Й. Шумскайте за помощь в подготовке, проведении и обсуждении экспериментов; Н. О. Кожевникову за консультации в решении теоретических вопросов. Автор признателен В.И. Самойловой за методические рекомендации и консультации по оформлению диссертационных материалов. Отдельное спасибо семье и друзьям, без их всесторонней поддержки подготовка диссертации была бы не возможна.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов, изложен выносимый на защиту результат исследования, приведены сведения о личном вкладе автора и апробации работы.

Глава 1 содержит аналитический обзор известных способов контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин, их достоинства и недостатки (4D сейсмика [Waal, Calvert, 2003], ретроспективный анализ КВД [Чепкасова, 2016], ГИС [Хмелевской, 2010; Сковородников, 2014], датчики-сигнализаторы наличия воды и песка в потоке газа [Телеметрический..., 2017]). Показано, что гидрохимический контроль [Kinnell, 1958; Инструкция по методам..., 1984; Гончаров, 1995; Крайнов, 1992; Каналин, 1997;

Чоловский и др., 2002; Муляк, 2008; Кошелев и др., 2014; Абукова и др., 2015] по сравнению с другими способами контроля обводнения скважин более совершенен за счёт возможности охвата регулярными исследованиями всего фонда скважин при минимальных затратах материальных и трудовых ресурсов, однако задача комплексной автоматизации контроля обводнения скважин, включающего отбор, анализ и диагностику попутной воды, требует решения.

Рассмотрены типы воды, встречаемой при разработке газовых и газоконденсатных месторождений (конденсационная, пластовая, техногенная), способы отбора проб попутной воды, применимость различных физико-химических параметров попутной воды (ионный, микроэлементный, газовый и изотопный состав, плотность) для определения её типа и известные способы диагностики долевого состава попутной воды.

Глава 2 посвящена разработке методики оперативного контроля за выполнением газовых и газоконденсатных скважин по онлайн измерению электрического сопротивления попутной жидкости.

В первой части выполнен анализ результатов экспериментальных измерений электрофизических параметров попутной воды.

Определённые диэлькометрическим методом параметры попутной воды (действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости, показатели преломления и поглощения, коэффициент излучения) зависят только от УЭП и не определяют пластовую и техногенную воду, а поскольку аппаратура и методика измерения сложнее, чем кондуктометрические измерения УЭП, то применять эти параметры для оперативного контроля за обводнением скважин нецелесообразно.

По результатам определения спектров времени поперечной релаксации методом ЯМР-релаксометрии установлено, что незначительные примеси элементов, не являющихся индикаторами пластовой и техногенной воды, но обладающих высокой магнитной восприимчивостью (Mn, Fe), значительно искажают время поперечной релаксации T_2 , что не позволяет применять ЯМР-релаксометрию для диагностики попутной воды.

Потенциометрический метод реализованный без пробоподготовки (выравнивания ионной силы и pH раствора, разбавления высококонцентрированных растворов) не работает в смесях воды различного генезиса ввиду взаимного влияния концентрации основных диагностических ионов Na^+ и Ca^{2+} на их измеренные концентрации. Выполнение же пробоподготовки исключает оперативность измерений и делает невозможным полевые и поточные измерения.

Удельная электрическая проводимость (УЭП) точнее коррелирует с долей пластовой и техногенной воды в смесях конденсационной и пластовой, конденсационной и техногенной воды соответственно (Рис. 1), поэтому кондуктометрические измерения наиболее перспективны для автоматизации измерения электрофизических параметров попутной воды.

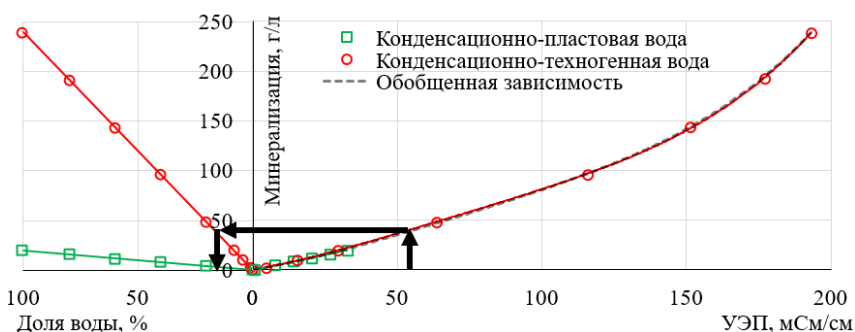


Рисунок 1 – Пример зависимости доли пластовой и техногенной воды от УЭП и минерализации

Во второй части для реализации непрерывного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин теоретически обоснована и экспериментально подтверждена работоспособность поточного резистивного датчика, устанавливаемого в углублении (пробоуловитель) на нижней образующей горизонтального участка трубопровода, что позволяет в непрерывном режиме накапливать, обновлять пробы попутной жидкости; измерять её электрическое сопротивление и температуру; рассчитывать электрическое сопротивление при 25 °С, УЭП, минерализацию и долю пластовой воды (Рис. 2).

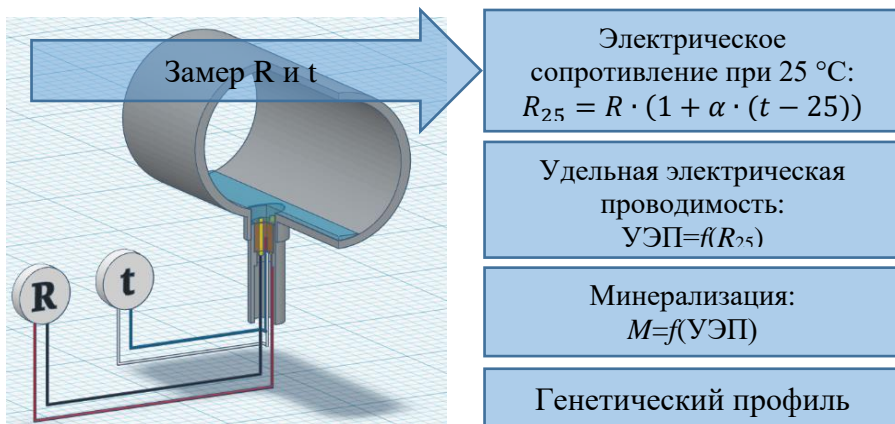


Рисунок 2 – Схематический вид и принцип работы пробоуловителя и ипоточного резистивного датчика

Поточный резистивный датчик выполнен в виде контактной кондуктометрической ячейки: два нержавеющей электрода диаметром 3 мм, высотой 2 мм и расположенные друг от друга на расстоянии 9 мм на поверхности изолятора, в который также установлен термодатчик (Рис. 3).



Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда и общий вид резистивного датчика

Поляризационное электрическое сопротивление R_s учитывается за счёт калибровки датчика по нескольким точкам с разной минерализацией, это позволяет для широкого диапазона минерализаций использовать ячейку одной конструкции и исключить регулировку частоты тока [Справочник по измерению...] (Рис. 4).

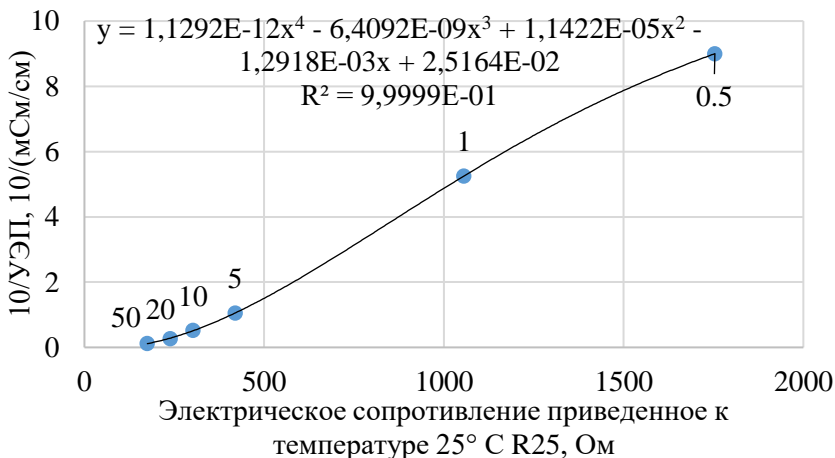


Рисунок 4 - Калибровочная зависимость удельной электрической проводимости от электрического сопротивления хлорид натрия при уровне жидкости над датчиком 10 мм (электроды из нержавеющей стали)

Известно, что при любых режимах течения газожидкостного потока, кроме дисперсно-кольцевого, на нижней образующей горизонтального трубопровода накапливается жидкость. Для дисперсно-кольцевого режима наличие жидкости на стенке горизонтальной трубы (равновесны унос менее 50%) обеспечивается при значении безразмерной скорости газа π_2 менее 0,0007 [Wallis, 1969]:

$$\pi_2 = \frac{v_g \mu_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}}, \quad (1)$$

где v_g – скорость газа, м/с; μ_g – динамическая вязкость газа, Па·с; σ – поверхностное натяжение, Н/м; ρ_g, ρ_f – плотность газа и жидкости соответственно, кг/м³.

С учётом этого критерия определены условия при которых обеспечивается накопление жидкости (Рис. 5, закрашенная область), при этом температурные условия влияют не значительно. Увеличение температуры с 5 до 25 °С увеличивает τ_2 не более чем на 11 %. При более высоких дебитах газа для увеличения количества жидкости на стенке предлагается использовать осевой завихритель [Пермяков, 2020].

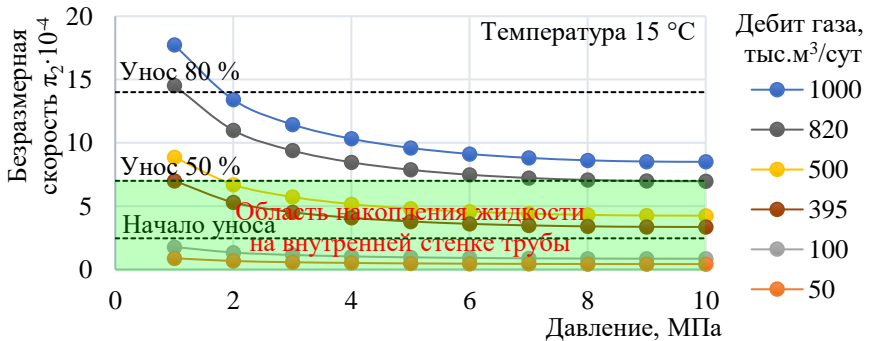


Рисунок 5 – Доля уноса жидкости в бесконечно длинной трубе в зависимости от безразмерной скорости газа при дисперсно-кольцевом режиме течения газожидкостного потока [Пермяков, 2020]

Очевидно, что измеряемое электрическое сопротивление будет зависеть от уровня жидкости в пробоуловителе. По результатам экспериментальных измерений резистивным датчиком электрического сопротивления водных растворов хлорида натрия минерализацией 1, 5 и 10 г/л при изменении толщины слоя жидкости от 3 до 14 мм установлено, что уже при 3 мм абсолютная разница расчётной и заданной минерализации составляет менее 0,3 г/л, а чувствительность кажущейся минерализации менее 0,2 г/(л*мм), а при толщине слоя жидкости 6 мм и более чувствительность кажущейся минерализации практически постоянна (Рис. 6).

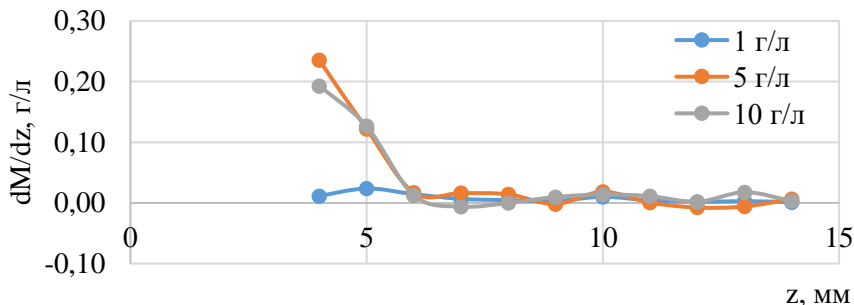


Рисунок 6 – Чувствительность кажущейся минерализации в зависимости от толщины слоя жидкости

По результатам динамических экспериментов на лабораторном стенде показано, что скорость газожидкостного потока (5-15 м/с) не влияет на наполняемость пробоуловителя, а следовательно, на расчётную минерализацию при заглублении резистивного датчика не менее чем на 8 мм.

По результатам экспериментальных данных наличие жидких углеводородов в газожидкостном потоке увеличивает значение электрического сопротивления жидкой фазы, но оно практически постоянное и не зависит от доли жидких углеводородов при соотношении водный раствор/керосин более 0,4 (Рис. 7).

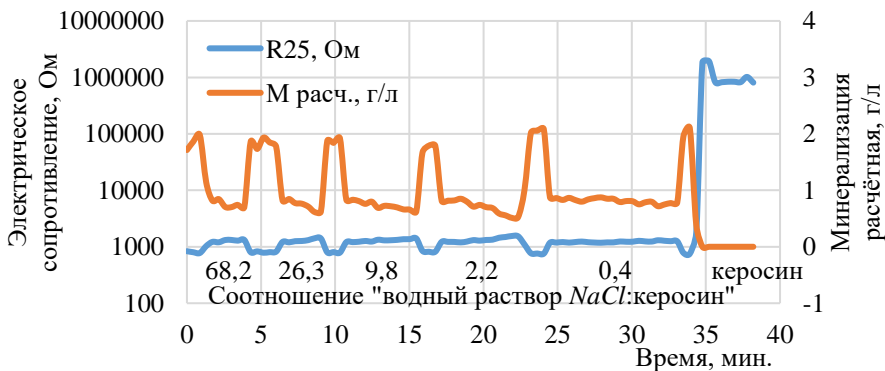


Рисунок 7 – Электрическое сопротивление эмульсии (водный раствор хлорида натрия с концентрацией 1 г/л и керосина) при разном соотношении раствор NaCl/керосин

Это, при соответствующей калибровке резистивного датчика, позволяет применять его в обвязке газоконденсатных скважин при объёмной доле жидких углеводородов от общей жидкости до 72%. Практически этот критерий определяется как отношение расчётных значений удельного количества конденсационной воды (рассчитывается по формуле Р. Ф. Бюкачека [Бюкачек, 1959]) к удельному количеству жидких углеводородов, выделившихся из добываемого газа при изменении термобарических условий при движении флюида от пласта до устья скважины (точки установки поточного резистивного датчика).

Результаты статических (Рис. 8) и динамических (Рис. 9) экспериментов с суспензиями показывают, что содержание механических примесей в газовом потоке практически не влияет на значения электрического сопротивления и расчётной минерализации при доле механических примесей в жидкой фазе газожидкостного потока до 10% по объёму.

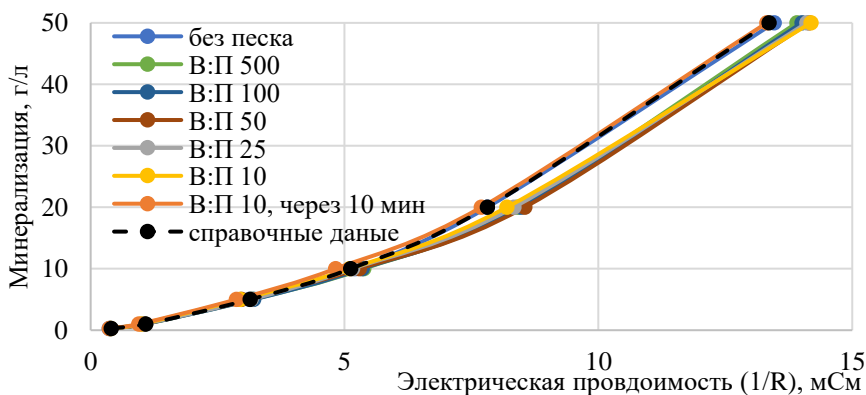


Рисунок 8 - Связь минерализации водного раствора хлорида натрия от измеренной резистивным датчиком электрической проводимости суспензии по результатам статического эксперимента

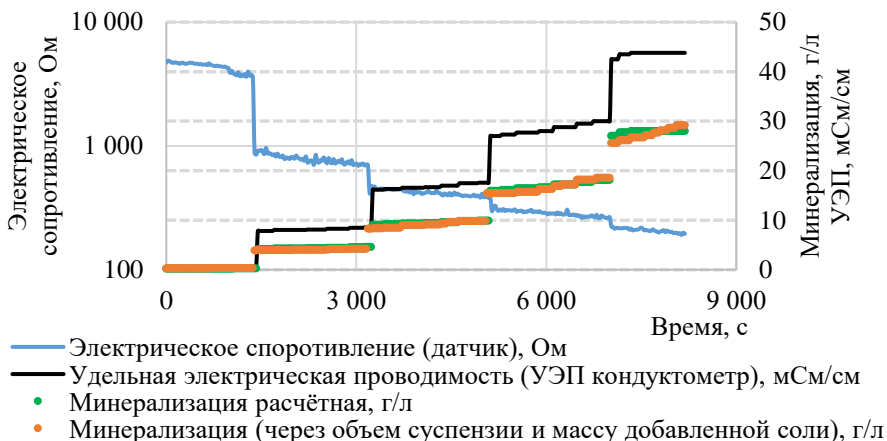


Рисунок 9 – Динамический эксперимент по изменению электрического сопротивления суспензии, УЭП и минерализации при ступенчатом добавлении хлорида натрия

В третьей части выполнено уточнение ионного состава и минерализации конденсационной и пластовой воды сеноманских и нижнемеловых пластов Западной-Сибири на примере месторождений ООО "Газпром добыча Надым", что позволяет с большей точностью диагностировать долю разных типов воды (Рис. 10).

Применяемые технические жидкости разнообразны, поэтому для повышения точности диагностики ионный состав их водной части важно определять по результатам ГХА или в крайнем случае по рецептуре при каждом геолого-техническом мероприятии.

По результатам статистического анализа результатов диагностики попутной воды из скважин на отложения нижнего и верхнего мела Западной Сибири за 2009-2019 гг. (по данным ООО "Газпром добыча Надым") показано, что соотношение частоты встречаемости типов воды практически не изменяется: около 60% от общего количества проб, представлены конденсационной водой, 15% проб представлены конденсационно-пластовой водой и оставшиеся 25% проб представлены двух- и трёхкомпонентными смесями техногенной воды с другими типами.

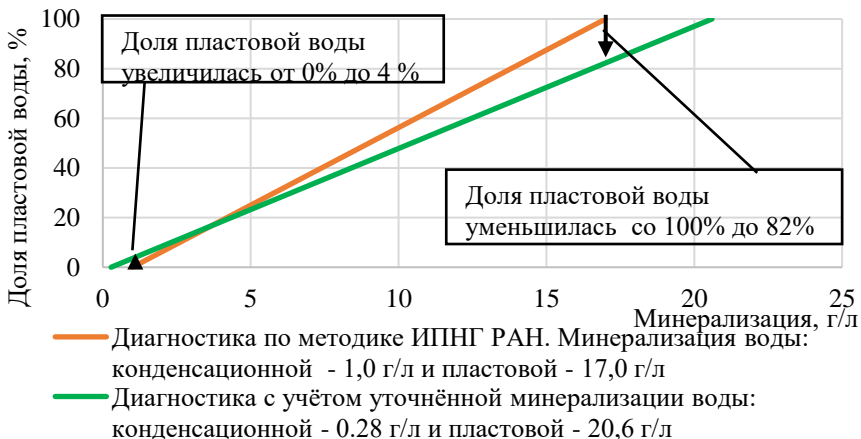


Рисунок 10 – Влияние уточненной минерализации конденсационной и пластовой воды на диагностику генезиса

В четвёртой части рассмотрены методики диагностики генезиса попутной воды: действующая (ИПНГ РАН); графоаналитическим способом по ионному составу (Патенты РФ № 2710652, № 2711024); по ионному составу с использованием формулы Ахундова и предложена методика диагностики по минерализации, также с применением формулы Ахундова, с использованием априорных данных о применении техногенных жидкостей на скважинах.

Численным моделированием доказано, что точность диагностики по любой методике напрямую зависит от точности определения содержания индикаторных элементов в пробе. С этой точки зрения предложенная диагностика по минерализации выгодно отличается от других методик, так как точность определения минерализации существенно выше в виду точности определения УЭП жидкости (менее 5 % для портативных кондуктометров) и высокой погрешности при определении концентрации ионов при гидрохимическом анализе (до 18%).

С учётом статистических данных по распределению проб по типам воды, диагностика по минерализации позволяет с высокой степенью достоверности диагностировать 75% всех отбираемых проб на рассматриваемых месторождениях ООО "Газпром добыча Надым". Для остальных 25% проб, представленных конденсационно-

пластово-техногенной водой необходим ручной отбор проб, при этом единственным способом диагностики является диагностика по ионному составу, определённом при стандартном гидрохимическом анализе или потенциометрическим способом с обязательной пробоподготовкой.

Итак, по результатам теоретических и экспериментальных исследований разработана методика оперативного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин, которая включает следующий порядок действий:

I. Подготовительный этап:

1. Новые датчики подлежат обязательной калибровке, заключающейся в измерении электрического сопротивления и удельной электрической проводимости растворов хлорида натрия известной минерализации при 25⁰ С и толщине слоя калибровочного раствора над датчиком не менее 10 мм;

2. Резистивные датчики устанавливаются в углублении 10 мм на нижней образующей горизонтального участка трубопровода обвязки скважины;

3. По мере поступления данных в электронный блок измерителя или в центральный сервер оператором заносится информация о применении в скважине технических жидкостей (дата, минерализация водной части технического раствора, тип соли $NaCl$, $CaCl_2$ или другие данные).

II. Измерения электрофизических параметров:

1. Вначале поточным резистивным датчиком измеряется электрическое сопротивление и температура контролируемой жидкости;

2. Затем с учётом температуры жидкости рассчитывается электрическое сопротивление, приведённое к стандартной температуре 25⁰ С;

3. Далее с применением калибровочных данных (п. I.1) рассчитывается удельная электрическая проводимость и минерализация попутной воды;

III. Диагностика генезиса по значению минерализации и априорным данным об отсутствии закачки технической жидкости (п. I.2) выполняется по алгоритму:

1. Проба с минерализацией меньше или равной минерализации конденсационной воды относится к 100% конденсационной воде;

2. Если техническая жидкость не закачивалась в скважину, а минерализация в интервале значений характерных для конденсационной и пластовой воды, то рассчитывается доля пластовой воды по формуле А. Р. Ахундова:

$$S_{\text{пл}} = \frac{(M - M_{\text{кон}})}{(M_{\text{пл}} - M_{\text{кон}})} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $S_{\text{пл}}$ – доля пластовой воды в пробе; M , $M_{\text{кон}}$, $M_{\text{пл}}$ – минерализация пробы попутной воды, конденсационной (принята 1 г/л) и пластовой, г/л.

3. В остальных случаях проба может представлять собой трёхкомпонентную смесь конденсационной, пластовой и техногенной воды - диагностика по минерализации только качественная: определяется возможна минимальная и максимальная доля каждого типа воды. Более точная диагностика осуществляется по одной из проанализированных методик [Способ диагностики попутных..., 2019; Способ диагностики попутных..., 2020] по результатам стандартного гидрохимического анализ (ГХА) пробы попутной воды, отобранной вручную.

IV. Далее повторяются измерения электрофизических параметров и диагностика генезиса.

Глава 3 содержит результаты длительных испытаний поточного резистивного датчика на скважине № 814 Медвежьего НГКМ и рекомендации по оптимизации гидрохимического контроля с применением разработанной методики.

Для снижения коррозионных процессов при полевых испытаниях электроды выполнены из платинированной проволоки (длина электродов 5 мм, диаметр 1 мм), кроме того использован шунтирующий резистор 120 кОм подключённый параллельно электродам для снижения электромагнитных наводок. Дискретность измерений электрического сопротивления составляет 2 секунды, для дальнейших расчётов используется значение моды за 3 минуты, что позволяет сгладить пульсацию электрического

сопротивления, обусловленного колебанием поверхности жидкости в пробоуловителе.

По данным гидрохимического анализа попутная вода на скважине № 814 диагностируется как 100% конденсационная вода с минерализацией 0,22 г/л. Поэтому для проверки работоспособности поточного датчика выполнены эксперименты с подачей на устье скважины водных растворов хлорида натрия разной минерализации.

Пробы жидкости для ГХА отбирались сразу после резистивного датчика (в 20 см по направлению движения газожидкостного потока), что позволило отбирать ту же жидкость, которая была в резистивном датчике. В целом можно отметить, что минерализация от 1 до 50 г/л включительно успешно диагностируется с погрешностью менее 20%. При минерализациях менее 1 г/л погрешность выше, однако это принципиально не вносит изменений в результат диагностики попутной воды, т.к. абсолютная разница ничтожна, а попутная вода однозначно диагностируется как конденсационная (Рис. 11).

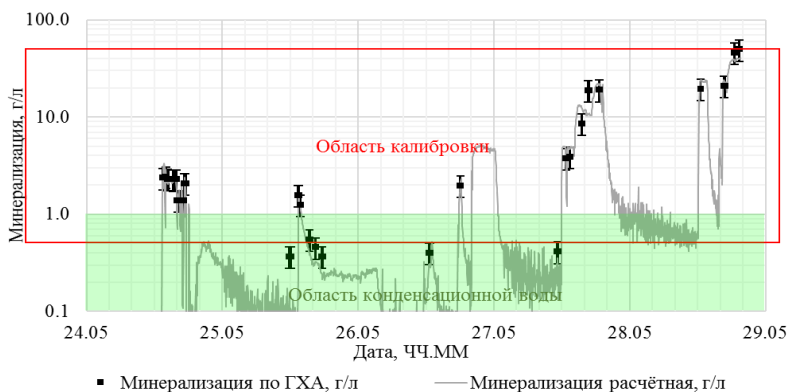


Рисунок 11 – Сравнение минерализации при закачке солевых растворов на устье скважины

При исключении проб по которым разница минерализаций больше $\pm 20\%$, коэффициент корреляции составляет 0,98 (Рис. 12), что в соответствии с Программой испытания является положительным результатом и позволяет на ранних этапах выявлять обводнение скважин и решает поставленную задачу по оперативному контролю за обводнением скважин.

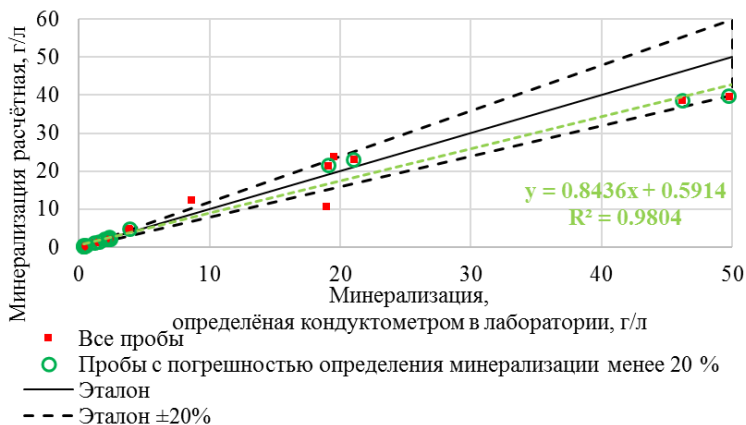


Рисунок 12 – Сопоставление минерализации по ГХА и данным поточного резистивного датчика

Очевидно, что внедрение резистивного датчика на каждой скважине требует значительных дополнительных капитальных затрат, поэтому предлагается оптимизировать предлагаемую методику за счёт укрупнения объекта контроля - перенос резистивного датчика со скважин на общую точку сбора продукции группы скважин (куст скважин, установка комплексной подготовки газа (УКПГ) [Пермяков, 2019]. Достаточно выявить момент обводнения группы скважин, при этом источник обводнения устанавливается за счёт разукрупнения объекта контроля до меньших групп скважин или отдельных скважин. После водоизоляционных работ и отработки скважины от техногенной воды или после ликвидации обводнённой скважины, групповой способ оперативного контроля за обводнением восстанавливает свою информативность.

Допустимое количество скважин в группе оценивается по величине минерализации пластовой воды и погрешности поточного датчика. При снижении количества скважин в общей точке или при большей минерализации пластовой воды увеличивается чувствительность контроля за обводнением в целом.

По результатам анализа экономических расчётов показано, что выбор оптимального варианта оперативного контроля зависит от доли проб, которые могут быть диагностированы по

минерализации, а значит, в общем случае, от стадии разработки месторождения (количества обводнённых скважин). Установка резистивных датчиков на устье всех скважин целесообразна для вводимого в разработку месторождения. На более поздних стадиях разработки рекомендуется укрупнять точку контроля до кустов скважин. Для мелких месторождений (до первых десятков скважин) укрупнение возможно в точке входа в установку комплексной подготовки газа. Кроме того, перед выполнением любых ГХА в лаборатории рекомендуется измерять УЭП и минерализацию кондуктометром, что позволит выявлять конденсационную воду, выполнять полный анализ которой нецелесообразно.

Наибольший эффект от внедрения оперативного контроля за обводнением скважин достигается не снижением затрат на химреактивы, а своевременной постановкой скважин в капитальный ремонт, сокращения времени простоя скважин, предотвращения аварийных ситуаций, снижения сложности, длительности, а, следовательно, и стоимости капитальных ремонтов. Оценочно вариант непрерывного мониторинга с установкой резистивный датчик на каждой скважине окупится за несколько месяцев работы одной восстановленной скважины при среднем дебите газа около 500 тыс. м³/сут.

В обобщённом виде оптимизированная за счёт укрупнения объекта контроля методика оперативного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин состоит из трёх уровней (Рис. 13).

На первом уровне осуществляется онлайн контроль минерализации попутной воды поточным резистивным датчиком и диагностика генезиса по минерализации. Увеличение минерализации по сравнению с предыдущими замерами указывает на приток высокоминерализованной воды, следовательно, необходимо разукрупнить объект контроля (до отдельных скважин) для установления источника притока этой воды – переход на второй уровень контроля.

На втором уровне контроля осуществляется отбор проб на устье скважины при рабочем дебите. По аналогии с первым уровнем контроля определяется общая минерализация проб, но при помощи портативного кондуктометра, и осуществляется диагностика

попутной воды по минерализации и выявляется обводняющаяся скважина. Пробы со скважин с закачанной технической жидкости подлежат более детальному анализу на третьем уровне контроля, по остальным скважинам усиление контроля не требуется.

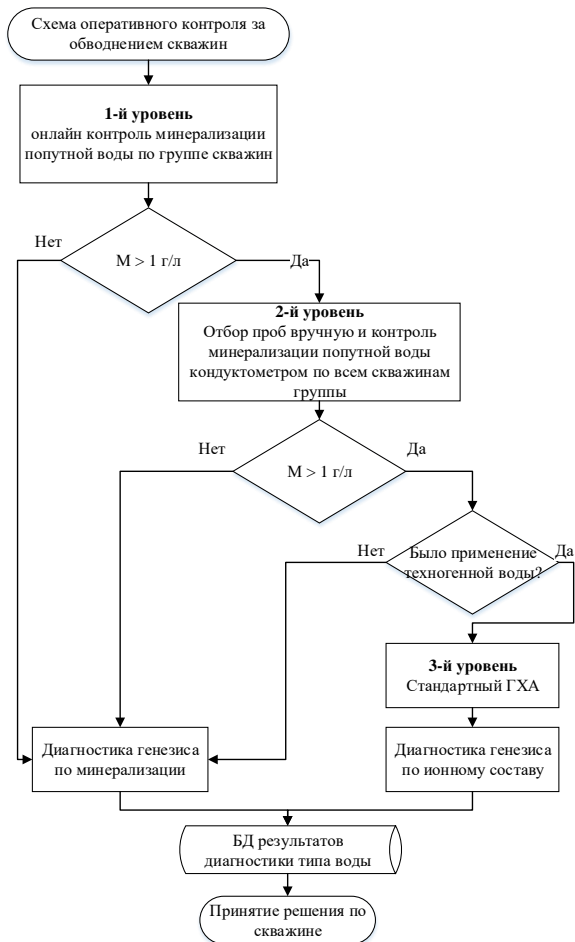


Рисунок 13 - Укрупнённая схема оптимизированного гидрохимического контроля за обводнением скважин

На третьем уровне контроля пробы подвергаются стандартному гидрохимическому анализу и диагностике попутной воды по ионному составу.

Результаты исходных замеров удельной электрической проводимости, ионного состава и результатов диагностики попутной воды с каждого уровня контроля аккумулируются в базе данных для оперативного их использования при анализе эксплуатации скважины, оценке эффективности геолого-технических мероприятий и принятия решения по дальнейшей эксплуатации, ремонту или ликвидации скважины.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты.

Разработанная методика оперативного контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин по непрерывному измерению электрического сопротивления попутной воды выгодно отличается от известных методик контроля за обводнением и имеет технологический, управленческий и экономический эффект.

Технологический эффект заключается в переходе от дискретного отбора проб к непрерывному мониторингу при минимальном участии работника. Это достигается за счёт применения в качестве диагностического признака типа воды её электрофизического параметра – удельной электрической проводимости (УЭП) вместо гидрохимических показателей, что значительно повышает оперативность исследования пробы попутной воды и позволяет по минерализации диагностировать генетический профиль попутной воды не содержащей техногенных растворов (около 75% всех отбираемых проб на месторождениях ООО "Газпром добыча Надым"). Для измерения УЭП используется поточный резистивный датчик, установленный в углублении на нижней образующей трубопровода, в том числе при объёмной доле механических примесей в попутной жидкости до 10% и жидких углеводородов до 72%.

Управленческий эффект заключается в возможности обнаружения первых этапов обводнения скважин, что позволяет предпринимать действия для предотвращения связанных с ним осложнений эксплуатации (разрушение прискважинной зоны пласта-коллектора, абразивный износ, накопление песчано-глинистой

пробки и др.). Это достигается за счёт непрерывного и единовременного мониторинга типа попутной воды по всему фонду скважин месторождения, в том числе с возможностью интеграции в систему «интеллектуального месторождения».

Экономический эффект от использования методики заключается: во-первых, в снижении простоев скважин и минимизации потерь в добыче газа, за счёт их своевременного вывода в ремонт; во-вторых, в снижении затрат на химические реагенты для лабораторий, снижении трудовых затрат лаборантов химического анализа и операторов по добыче нефти и газа за счёт сокращения ручного отбора проб и их лабораторного анализа. Для сокращения капитальных затрат на оборудование промыслов поточным измерителем минерализации разработаны критерии позволяющие обоснованно выбирать необходимую степень укрупнения объектов контроля с учётом стадии разработки месторождения, минерализации пластовой воды, количества объединяемых скважин и стоимости гидрохимических анализов.

У разработанной методики оперативного контроля за обводнением есть и недостаток. В случае, когда по априорным данным попутная вода может содержать техногенную воду (по статистике это 25 % всех проб) диагностика по минерализации лишь качественная - оценивается содержание разных типов воды в диапазоне возможной минимальной и максимальной их доли. Более точная диагностика осуществляется по результатам стандартного гидрохимического анализ (ГХА) пробы попутной воды, отобранной вручную, но в этом случае снижается частота и оперативность контроля.

Запланировано дальнейшее развитие методики контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин:

1. В ближайшей перспективе - оценить стабильность показаний резистивного датчика при наличии в потоке механических примесей, представленных глинистыми частицами, способными консолидироваться в случае осаждения в пробоуловителе и исказить показания резистивного датчика.

2. На будущее – разработка способов определения индикаторов техногенной воды.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ Основные публикации по теме диссертации

1. Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии / М.Й. Шумсайте, ... **В.С. Пермяков** [и др.] // Известия Томского политехнического института. Инжиниринг георесурсов. - 2017. – № 2. - С. 59-66.
2. Диэлектрические и радиоизлучательные характеристики пластовых и конденсационных вод из газоносных скважин / М.И. Эпов, ... **В.С. Пермяков** [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. - № 7. – С. 1047-1056. (Переводная версия: Dielectric and radio-frequency emission parameters of formation and condensate waters from gas wells / M.I. Eпов, ... **V.S. Permyakov** [et al.] // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58(7). – pp. 836-843.)
3. Контроль за обводнением газовых скважин по удельной электрической проводимости жидкой фазы водогазового потока / **В.С. Пермяков** [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 5. - С. 52-57.

Патенты

4. Способ диагностики попутных вод газовых скважин по данным химического анализа: Пат. 2710652 Российская Федерация, E21B47/00 / Д. В. Манзырев, ... **В.С. Пермяков** [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Надым». - № 2018113380; заявл. 12.04.18; опубл. 30.12.2019.
5. Способ диагностики попутных вод газоконденсатных скважин по данным их анализа электрохимическими методами: Пат. 2711024 Российская Федерация, E21B47/00 / Д.В. Манзырев, ... **В.С. Пермяков** [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Надым». - № 2018113381; заявл. 12.04.18; опубл. 14.01.2020.

Наиболее значимые доклады на конференциях

6. **В.С. Пермяков**, А.Н. Харитонов, Ю.А. Архипов. Результаты сравнительного анализа методик определения генезиса воды выносимой из газовых скважин // Сборник тезисов 69-ой международной молодёжной научной конференции «Нефть и газ –

2015» (Москва, 14-16 апреля 2015). - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015.

7. **Пермяков В.С.** Оперативная диагностика генезиса воды, выносимой из скважин // Тезисы докладов XII-ой всероссийской конференции молодых учёных, специалистов и студентов. «Новые технологии в газовой промышленности». Секция 1. Геология, поиск и разведка нефтегазовых месторождений (Москва, 24-27 октября 2017). – М.: РГУ НиГ им. И.М. Губкина, 2017. – С. 22.

8. Перспективы использования электрохимических методов анализа для диагностики происхождения попутных вод газоконденсатных скважин / **Пермяков В.С.** [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" (Новосибирск, 17–21 апреля 2017). - Новосибирск: СГУГиТ, 2017. - Т. 4. - С. 8-12.

9. Оптимизация схемы гидрохимического контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин / **В.С. Пермяков** [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" (Новосибирск, 24-26 апреля 2019). - Новосибирск: СГУГиТ, 2019. - Т. 2., № 3 - С. 201-208.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 25.11.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 203

ИНГТ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3