

На правах рукописи

Алексей Владимирович Моисеенков

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ
ЦЕЛОСТНОСТИ ПОКРЫШЕК ФЛЮИДОУПОРОВ ПРИ
РАЗМЕЩЕНИИ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ЖИДКОСТЕЙ В ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ НЕДР**

Специальность 1.6.9 Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «Сахалинская энергия» в управлении научно-технического развития и технических данных.

Научный руководитель: **Дубиня Никита Владиславович**,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, ведущий научный
сотрудник, заведующий лабораторией фундаментальных
проблем нефтегазовой геофизики и геофизического
мониторинга

Официальные оппоненты: **??? Карев Владимир Иосифович**,
доктор технических наук,
?????

??? Ялаев Тагир Рустемович
кандидат физико-математических наук,
?????

Ведущая организация: **Геологический факультет Московского
государственного университета им. М.В. Ломоносова**

Защита состоится _____ месяца _____ г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета
24.1.132.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10,
стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru.
Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при
Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте
института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять
по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому
секретарю диссертационного совета Руслану Александровичу Жосткову.

Автореферат разослан « _____ » _____ 20 _____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Освоение месторождений углеводородов, расположенных в прибрежных акваториях, становится одной из самых актуальных практических задач топливно-энергетического сектора ввиду постепенного истощения запасов на месторождениях нефти и газа, расположенных на суше. Освоение и разработка морских месторождений требуют разработки и применения принципиально новых подходов к решению проблем, не возникающих при работе на суше. В частности, решение задачи утилизации отходов бурения и технологических жидкостей при освоении морских месторождений осложняется множеством факторов: ограниченным количеством скважин, особенностями инфраструктуры и сложной логистикой. При освоении отдельных месторождений, например, расположенных в северных широтах, климатический фактор, делающий месторождения практически недоступными значительную часть времени. Кроме того, утилизация отходов бурения и технологических жидкостей на морских месторождениях характеризуется повышенными экологическими и геологическими рисками. Совокупность этих факторов определяет актуальность технологий контроля состояния пластов и развития новых методов утилизации технологических отходов, направленных на повышение экономической эффективности и снижение сопутствующих рисков при освоении и разработке месторождений на море.

Цель работы

Целью диссертационного исследования является снижение геологических и экологических рисков, сопряженных с утилизацией буровых и технологических отходов при разработке морских месторождений углеводородов, характеризующихся сложными географическими и климатическими условиями.

Основные задачи исследования

1. Обзор современного состояния технологий и методик утилизации буровых и технологических отходов в мировой практике; выбор оптимальных технологий для работы на морских месторождениях углеводородов, расположенных в зонах с тяжелыми климатическими условиями.
2. Оценка геологических и экологических рисков реализации технологии обратной закачки отходов в пласты-домены.

3. Разработка системы геофизического мониторинга состояния пластов доменов и пластов флюидоупоров для динамики их состояния и его изменения в ходе проведения обратной закачки.
4. Создание концептуальной системы принятия решений по условиям размещения отходов, основанной на введении понятий технического и операционного пределов давления и учитывающей данные геофизического мониторинга и результаты одномерного геомеханического моделирования.
5. Разработка упрощенной математической модели процесса размещения отходов в глубоких горизонтах недр, позволяющей прогнозировать изменения состояния пластов флюидоупоров при выбранных условиях закачки для оценки геологических рисков и своевременного принятия решений об изменении режима работы скважины.
6. Применение разработанной системы принятия решений и системы геофизического мониторинга на территории с суровыми ледовыми условиями - остров Сахалин, с целью реализации технологии размещения отходов путем закачки в недра с минимумом геологических и экологических рисков.

Научная новизна работы заключается в создании принципиальной концепции для определения безопасных и эффективных условий обратной закачки отходов бурения и технологических отходов в пласты домены и разработке системы геофизического контроля состояния пластов доменов и флюидоупоров. Аналоги разработанной системы комплексного геофизического мониторинга не использовались ранее в мировой практике для контроля состояния пластов флюидоупоров и решения задачи понижения геологических и экологических рисков при обратной закачке буровых и технологических отходов. Предложенная концепция технологического и операционного пределов при обратной закачке является уникальной и позволяет принимать обоснованные решения при контроле условий обратной закачки на основании установленных операционных и технических пределов, полученных на основании комплекса геофизических данных, для достижения максимально безопасного и экономически эффективного уровня утилизации буровых и технологических отходов в условиях морских месторождений углеводородов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Система комплексного геофизического мониторинга, разработанная автором, позволяет реализовать программу утилизации отходов бурения с минимизацией

геологических и экологических рисков в условиях труднодоступных морских месторождений.

2. Размещение буровых и технологических отходов в подземных пластах-доменах с геофизическим и геомеханическим контролем флюидоупоров является предпочтительной технологией утилизации отходов бурения для разработки месторождений в акватории о-ва Сахалин.
3. Концептуальная и математическая модель условий прорыва пласта-флюидоупора позволяет использовать данные геофизического мониторинга для прогноза операционных пределов закачки отходов бурения в пласт со снижением геологических рисков.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная система комплексного геофизического мониторинга для контроля состояния пластов флюидоупоров в ходе обратной закачки, сопутствующая математическая модель и система принятия решений об изменении режима закачки на основании концепций операционного и технологического пределов позволяет снизить геологические и экологические риски разработки месторождений углеводородов на море. Практическая реализация системы позволяет решать проблему утилизации отходов бурения и технологических жидкостей на морских месторождениях углеводородов, играющих важную роль среди объектов топливно-энергетического комплекса Российской Федерации на современном этапе его развития. Результаты практического применения комплексов геофизического мониторинга и прогнозирования наполнения пластов-доменов на основе предложенной концепции технических и операционных пределов на морских месторождениях ООО «Сахалинская Энергия» демонстрируют успешную реализацию выбранной технологии размещения отходов с достижением высоких экономических показателей эффективности, а также с предупреждением экологических катастроф.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 120 страниц, 24 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 109 наименований.

Личный вклад

Результаты работы, полученные лично соискателем в ходе проведения исследования, включают: выполнение обзора литературы, обоснование оптимальности технологии обратной закачки буровых и технологических отходов для условий морских месторождений со сложными климатическими условиями; разработку

концепции геомеханического и геофизического контроля состояния пластов флюидоупоров и формирование системы комплексного геофизического контроля их состояния; разработку концептуальной модели операционного и технологического пределов закачки и формулировку упрощенной математической модели установления пределов и прогнозирование наполнения пластов-доменов. Практическая реализация разработанной методики проводилась лично или под непосредственным руководством автора.

Апробация работы

На сегодняшний день результаты работы успешно используются при эксплуатации 5 специальных поглощающих скважин, предназначенных для размещения отходов бурения и технологических жидкостей. Накоплен многолетний уникальный опыт в проектировании такого рода скважин, их бурении, капитальном и подземном ремонте, операционный опыт в подготовке и непосредственной закачке отходов бурения и технологических жидкостей, сформированы требования к геологическим условиям и петрофизическим свойствам поглощающих горизонтов и пластов-флюидоупоров, разработана система мониторинга закачки и контроля целостности геологического разреза. На конец 2024 года, через специальные поглощающие скважины, в глубоких горизонтах недр размещено 1 299 246 м³ буровых отходов и технологических жидкостей. Опубликовано 18 статей в различных отраслевых издательствах с освещением подходов и результатов работ, а также 16 расширенных тезисов докладов, представленных на различных отраслевых конференциях, разработано 2 объекта интеллектуальной собственности. Работа, основанная на результатах, изложенных в диссертации, получила премию ПАО «Газпром» в области науки и техники за 2023 год. Тема работы, представленной на премию: «Разработка и внедрение уникальной технологии контроля размещения отходов бурения и технологических жидкостей при разработке шельфовых месторождений нефти и газа».

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Н.В. Дубине за плотное сотрудничество и поддержку на всех этапах выполнения работы, сотрудников ИФЗ РАН С.А. Тихоцкого и И.О. Баюк, Е.В. Новикову за ценные методические советы при подготовке диссертации. Сотруднику ООО «Литосфера» Я.И. Юсупову, за помощь в построении 1D геомеханической модели. Своим коллегам А.В. Хабарову, А.В. Бересневу, А.К. Таланкину, И.М. Иванциву, М.В. Петровой за

постоянные консультации в области петрофизики, геомеханики, геофизических исследований скважин и 4D сейсмомониторинга. В.А. Колчину, С.В. Никитину, за помощь в реализации программного продукта «eWellBook» с модулем мониторинга и прогнозирования наполнения пласта-домена. Т.Н. Гафарову, Р.Н. Окишеву, Р.Г. Облекову, И.В. Абрамову за постановку правильных производственных задач с фокусом на безопасное производство и за поддержку в реализации концепции мониторинга в ПО «eWellBook» основанного на одном из защищаемых положений. И.Н. Сахаровой и А.С. Семенковой, А.В. Константинову за наставничество в области развития программного продукта и методической поддержке при подготовке диссертации. А.В. Шейкину за предоставленную возможность пройти дополнительные образовательные курсы по теме и за внедрение программы развития и накопления компетенций используемых при разработке шельфовых месторождений России. В.А. Григорьеву за помощь в оформлении патента № 2819034 «Способ захоронения буровых и технологических отходов при эксплуатации нефтегазоконденсатных, нефтяных и газовых месторождений».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна работы, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору современных методов утилизации технологических отходов при освоении и разработке месторождений нефти и газа. Целью данного исследования является обоснованный выбор оптимального метода утилизации, применимого при освоении труднодоступных морских месторождений с учетом их специфики.

В разделе 1.1 представлены результаты анализа методов обработки и утилизации отходов бурения. На основании обзорных литературных источников, а также детальных исследований различных способов утилизации рассмотрены плюсы и минусы девяти основных подходов, включающих: размещение на полигонах на суше, биологическую деградацию, физико-химическую обработку, перевод жидкости в сверхкритическое состояние, электрокинетическую обработку, стабилизацию, размещение в соляных кавернах, размещение в многолетнемерзлых породах, размещение в подземных пластах с контролем по наблюдательным скважинам. Помимо непосредственно технологических плюсов и минусов детально рассмотрены особенности экологического воздействия на окружающую среду. Проведен сравнительный анализ технологий, введена авторская метрика, позволяющая ранжировать их с учетом следующих факторов: возможность осуществления контроля процессов, сопровождающих размещение буровых отходов и технологических жидкостей; экологическая безопасность; возможность поддержания непрерывности производства и бурения; прогностическая способность с использованием современных методов измерения; возможность утилизации больших объемов отходов в сжатые сроки; применимость на месторождениях северных широт и морских месторождениях; возможность дополнительного применения при захоронении большого объема других видов отходов в смежных отраслях; стоимость реализации метода в условиях морских месторождений в северных широтах. Каждая описанная технология оценивалась по перечисленным категориям, в результате чего появилась возможность выявить предпочтительные технологии. Установлено, что только три технологии могут быть эффективно реализованы на практике при разработке морских месторождений:

размещение на специальных полигонах на суше; применение различных термических методов, таких как сжигание и пиролиз; размещение отходов в подземных пластах (доменах) с геомеханическим и геофизическим контролем целостности флюидоупоров. Продемонстрировано, что последняя технология является предпочтительной с точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности для условий труднодоступных морских месторождений углеводородов, в частности, для месторождений углеводородов прилегающей акватории острова Сахалин.

Основной результат по главе 1 сформулирован в разделе 1.2, в котором указаны рекомендации по использованию технологии размещения отходов в подземных пластах с покрывающими непроницаемыми покрывками флюидоупорами, особенно с применением современных методов контроля целостности данных флюидоупоров. Показано что несмотря на свои преимущества, реализация данного метода сопряжена с рядом объективных геологических рисков, среди которых можно выделить прорыв флюидоупорной покрывки, который может привести к значительным экологическим и экономическим потерям. Выявлена необходимость предотвращения данного риска и потребность в разработке системы мониторинга, которая позволит своевременно обнаруживать и устранять потенциальные угрозы, обеспечивая безопасность и устойчивость процесса обратной закачки.

Во **второй главе** представлено подробное описание технологии обратной закачки бурового шлама и сопутствующих жидкостей при бурении скважин в подземные геологические пласты-объекты.

В **разделе 2.1** описаны основные положения рассматриваемой технологии. Процесс закачки отходов бурового шлама в целевой пласт технологически состоит из нескольких стадий: сбор отходов бурения; измельчение отходов и замешивание их с вязким флюидом для удовлетворения требованиям к закачиваемым в породу отходам; закачка смеси в целевой пласт с использованием насосов высокого давления. Целевой пласт выбирается в соответствии со способностью выше- и нижележащих пластов служить флюидоупором: при проведении закачки реализуется инициация и развитие трещины, схожей с магистральной трещиной гидроразрыва. На первом цикле закачки в пласте развивается классическая трещина гидроразрыва, направленная вдоль максимального и перпендикулярно минимальному главным напряжениям. После прекращения первого цикла происходит миграция закачанной смеси в пласт, перераспределение давления флюида в окрестности скважины и, соответственно, изменяется напряженно-деформированное состояние пород околоскважинной и

околотрещинной зон. Повторная закачка происходит в уже нарушенном поле напряжений, в связи с чем может произойти повторное раскрытие уже сформированной трещины и/или инициация новой, что ведет к развитию в пласте зоны трещиноватости. Подчеркиваются риски прорыва системой трещин вышележащих пластов (флюидоупоров). Исходя из условий такого развития, пласт, в который производится закачка, выбирается на основании упруго-прочностных свойств и распределения пластовых напряжений: для успешного проведения циклической закачки необходим высокий контраст между минимальными напряжениями, действующими в целевом пласте и пласте-флюидоупоре, поскольку в ходе закачки происходит рост эффективных напряжений.

В разделе 2.2 описаны основные этапы реализации технологии обратной закачки: подготовка проекта к эксплуатации; операционная стадия закачки – контроль рабочих параметров; мониторинг и подтверждение целостности системы.

На первом этапе значительное внимание уделяется критериям, на основании которых выбирается целевой пласт. На основании литературных данных предложен набор требований: мощность целевого пласта более 2 м; мощность пласта-флюидоупора более чем в 4 раза больше мощности целевого пласта; проницаемость между 10 мД и 10 Д; глубина залегания целевого пласта между 200 и 3000 м; наличие переслаиваний песка и сланца (несколько слоев). Также проанализирован механизм сдерживания зоны разрушения флюидоупорами. Рассмотрены три механизма: барьер напряжений (наличие пласта над зоной закачки с более высоким давлением разрушения), барьер проницаемости (наличие высокопроницаемого пласта над зоной закачки с более низким давлением разрушения) и барьер модуля упругости (наличие пласта над зоной закачки с более высоким модулем упругости). Кратко описан комплекс геофизических исследований, на основании которых могут быть получены данные для успешного выбора целевого пласта-домена. Отмечена необходимость прогноза давлений закачки для корректного подбора поверхностного оборудования на данном подготовительном этапе.

На втором этапе – операционном – происходит периодическая закачка пульпы бурового шлама в скважину. Объем одной порции составляет до 250 м³, после чего закачка пульпы в скважину останавливается для подготовки следующей порции пульпы бурового шлама. Продолжительность такой остановки не превышает 3 часа, если отходов бурения больше нет, в скважину закачивается продажная порция объемом которой складывается из объема скважины и дополнительных 90 м³ морской воды, с

целью перепродавки единичной порции пульпы из скважины в трещину, после чего закачка прекращается и наступает закрытие трещины. При необходимости закачать несколько порций пульпы бурового шлама, после каждой порции пульпы объемом до 250 м³ закачка останавливается на период до 3 часов для релаксации, после чего можно закачать следующую порцию пульпы. При достижении накопленного объема порций 1000 м³ осуществляется промывка скважины морской водой объемом до 150 м³, после чего скважина закрывается на релаксацию на период до 12 часов. В работе дано описание того, какое оборудование используется для контроля процесса закачки отходов бурения. При долгосрочном процессе закачки твердых и жидких отходов, напряжение в пласте в районе системы трещин постепенно возрастает и приближается к напряжению в покрывающем флюидоупоре. Если напряжения в системе трещин не контролировать, то рано или поздно напряжения в системе трещин превысят допустимые значения и произойдет прорыв флюидоупора. Для предотвращения таких ситуаций устанавливают рабочие и технические пределы – ключевой момент, обсуждению которого посвящена глава 3.

Для индикации текущего давления и напряжения в пласте используют давление закрытия трещины. Постепенно наблюдается рост давления закрытия трещины, которое в перспективе достигает рабочих и технических пределов. В работе описана система мониторинга давлений закрытия трещины и сравнение этих значений с установленными пределами, относящаяся к третьему этапу реализации технологии обратной закачки. В работе описано, каким образом используются следующие методы промыслово-геофизического контроля: акустические и ультразвуковые, электромагнитные методы, профилометрия, методы оценки профиля приемистости и движения флюидов (термометрия, шумометрия, расходометрия), скважинная съемка. Представлен пример реализации программы контроля для специальных поглощающих скважин.

Раздел 2.3 содержит описание предлагаемой системы мониторинга состояния целевого пласта и пластов-флюидоупоров с использованием разномасштабных геофизических методов. Рассмотрены минимальный и оптимальный комплексы исследований, используемых для выбора и контроля состояния пластов.

К **минимальному** комплексу исследований, необходимых для корректного **выбора** целевого пласта отнесены: трехмерные сейсмические исследования; скважинные исследования (электрический, температурный, нейтронный и гамма-каротажи); лабораторные исследования электрических, транспортных и механических

свойств пород, слагающих целевой пласт. К **оптимальному** комплексу для выбора целевого пласта дополнительно отнесены: специальные скважинные исследования (кавернометрия, кросс-дипольный каротаж, электрическое и акустическое микросканирование); лабораторные исследования механических свойств пород, слагающих пласты-флюидоупоры.

К **минимальному** комплексу исследований, необходимых для **контроля и мониторинга** состояния пластов отнесены только контроль целостности ствола скважины и мониторинг давления закачки. Однако использование только минимального комплекса исследований сопряжено со значительными экологическими рисками, поэтому важно использовать **оптимальный** комплекс методов мониторинга, к которым отнесены: четырехмерные сейсмические исследования, вертикальное сейсмическое профилирование; скважинные методы (контроль температуры и спектральная шумометрия).

На основании описанных подходов предложена программа, состоящая из следующих элементов: 1) геомеханический анализ и оценка прочностных свойств пластов-флюидоупоров; 2) оптоволоконный температурный контроль, включающий применение распределенной термометрии для непрерывного мониторинга температуры по стволу скважины; 3) каротаж спектральной шумометрии и высокочувствительной термометрии 4) 4D-сейсмомониторинг; 5) оптоволоконное трехмерное вертикальное сейсмическое профилирование.

Основным результатом по главе 2 является сформулированная в **разделе 2.4** программа комплексирования разномасштабных геофизических методов исследований для реализации технологии обратной закачки с минимальными экологическими рисками и высокой экономической эффективностью.

Глава 3 посвящена концептуальной и математической модели обратной закачки, использующейся для выбора параметров, при которых происходит реализация рассматриваемой технологии.

В **разделе 3.1** введены ключевые понятия технического (проектного) и операционного (рабочего) пределов давления закачки. Концептуальный подход основан на условии недопущения прорыва трещин в вышележащий пласт-флюидоупор. На рисунке 1 схематично представлено поведение давления в целевом пласте по мере продолжения закачки (использована аббревиатура КРС – капитальный ремонт скважины).

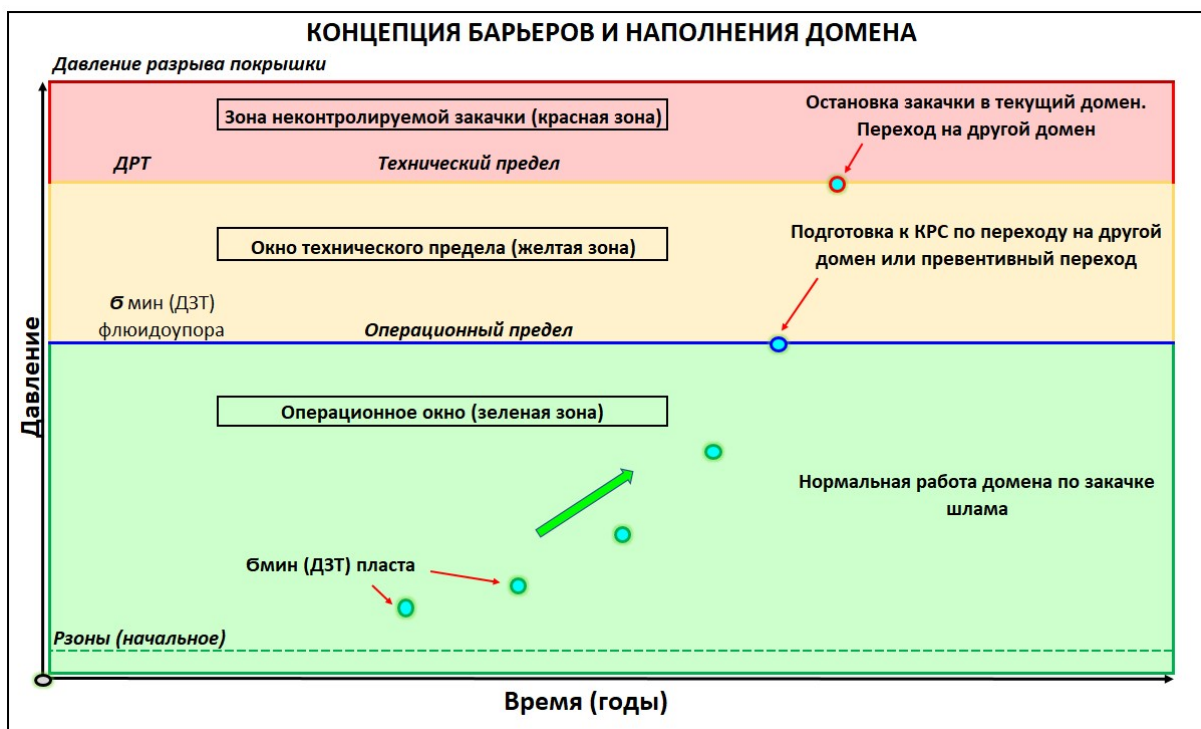


Рисунок 1. Схема наполнения пласта домена во времени и установленные пределы

Результаты наблюдений показывают, что давление закрытия трещины растет после циклов закачки, что говорит о постепенном росте минимального главного напряжения в целевом пласте. Для каждого пласта может быть определен предел прочности самого пласта и покрывающего флюидоупора. Для наглядной визуализации могут быть использованы различные цвета, например, зеленый - для безопасной зоны закачек, именуемой “операционным окном”; желтый - для сигнализации скорого наполнения пласта, именуемый “окном технического предела”; красный - для зоны неконтролируемых закачек, именуемый “окном вне технического предела”, в рамках которого наиболее вероятны прорывы флюидоупора. Верхняя граница зеленой зоны находится на значении минимального горизонтального напряжения флюидоупора. Верхняя граница желтой зоны находится на значении давления распространения трещины во флюидоупоре. Нижняя граница красной зоны начинается также от давления распространения трещины во флюидоупоре и может доходить до величины давления гидроразрыва флюидоупора. Давление гидроразрыва флюидоупора не рекомендуется к использованию в качестве нижней границы красной зоны в связи с возможным присутствием пород с естественной трещиноватостью. В таких породах ввиду развития естественных трещин фактический прорыв флюидоупора происходит

при давлении распространения трещины, которое меньше, чем давление гидроразрыва пласта флюидоупора. В процессе закачки при достижении в пласте давления, равного пределу, а именно давлению распространения трещины во флюидоупоре, необходимо переводить закачку на другой пласт.

Технический предел определяется прочностными свойствами пород и устанавливается на уровне давления распространения трещины во флюидоупоре ($ДРТ_{флюидоупора}$). Превышение этого предела приводит к неконтролируемым закачкам и прорыву трещин через флюидоупор.

Операционный предел устанавливается на уровне давления закрытия трещины во флюидоупоре ($ДЗТ_{флюидоупора}$). Достижение этого предела указывает на заполнение зоны размещения отходов и требует либо остановки скважины, либо перехода на другой интервал закачки.

Перед началом закачки в зону поглощения исходное пластовое давление зоны размещения ($P_{зоны}$) должно быть ниже минимального горизонтального напряжения в пласте ($\sigma_{мин\ пласта}$). Это напряжение, в свою очередь, должно быть ниже минимального горизонтального напряжения флюидоупора ($\sigma_{мин\ флюидоупора}$), которое, в свою очередь, ниже давления распространения трещины во флюидоупоре ($ДРТ_{флюидоупора}$). Таким образом, соблюдается следующая иерархия:

$$P_{зоны} < \sigma_{мин\ пласта} (ДЗТ) < \sigma_{мин\ флюидоупора} (ДЗТ) < ДРТ_{флюидоупора}$$

Минимальное горизонтальное напряжение ($\sigma_{мин}$) определяется как давление закрытия трещины (ДЗТ). Это значение является наиболее точным приближением для $\sigma_{мин}$. Давления $ДЗТ_{пласта}$, $ДЗТ_{флюидоупора}$ и $ДРТ_{флюидоупора}$ определяются для каждой зоны размещения на основе данных из скважин или геомеханической модели месторождения.

В рамках данной концепции сделаны следующие предположения: флюидоупор считается непроницаемым пластом, расположенным над пластом-коллектором; термоупругий эффект при закачке отходов не учитывается из-за малых объемов порционной закачки достаточного периода остановки и восстановления пластовой температуры; динамический пороупругий эффект не учитывается из-за кратковременности порционных закачек; статический пороупругий эффект в пласте учитывается при определении давления закрытия трещины ($ДЗТ_{пласта}$), во флюидоупоре этот эффект не учитывается из-за низкой проницаемости; трещины распространяются

латерально в пределах зоны закачки из-за более низкого минимального горизонтального напряжения в пластах-коллекторах по сравнению с флюидоупором.

В разделе 3.2 представлена упрощенная математическая модель, используемая для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния целевого пласта вследствие периодической закачки. Смесь отходов бурения и жидкости рассматривается как упруго-вязко-пластическое тело с нелинейной реологией. Поле порового давления определяется через решение задачи однофазной фильтрации от скважины, разрабатывающей бесконечный однородный горизонтальный пласт. Соответствующее изменение напряженного состояния определяется в рамках концепции эффективных напряжений Био. Критическое значение давления, при котором происходит прорыв трещины в вышележащий пласт-флюидоупор, определяется по основным законам механики хрупкого разрушения с использованием силового критерия. Используется упрощенная модель развития одиночной плоской трещины разрыва в вертикальной плоскости, развивающейся в слоистой среде, модули упругости которой зависят только от глубины. Зависимость упругих модулей от глубины описывается ступенчатой функцией. При этом напряжение в целевом пласте представляется зависящим от времени, а напряжения во флюидоупорах постоянны.

Для успешного применения предложенной модели для описания процесса изменения напряженно-деформированного состояния среды в ходе закачки используются следующие параметры: упруго-прочностные и фильтрационно-емкостные свойства целевого пласта; исходное распределение минимального горизонтального напряжения; объемы и темпы закачки; давление закрытия трещины после прекращения закачки на каждом цикле.

В разделе 3.3 описано, каким образом перечисленные параметры могут быть получены по фактическим данным. Основное внимание уделено вопросу интерпретации кривой падения давления после прекращения закачки. Для оценки давления закрытия используется сопоставление поведения давления, первой производной давления, полулогарифмической производной давления в зависимости от специальной функции времени (G-функции).

Пример интерпретации фактических данных циклической закачки показан на рисунке 2, содержащем: зависимость объема закачанной жидкости от времени, представленную сплошной кривой; зависимость давления в трещине от времени,

представленную пунктирной кривой; определенные моменты закрытия трещины, обозначенные точками.

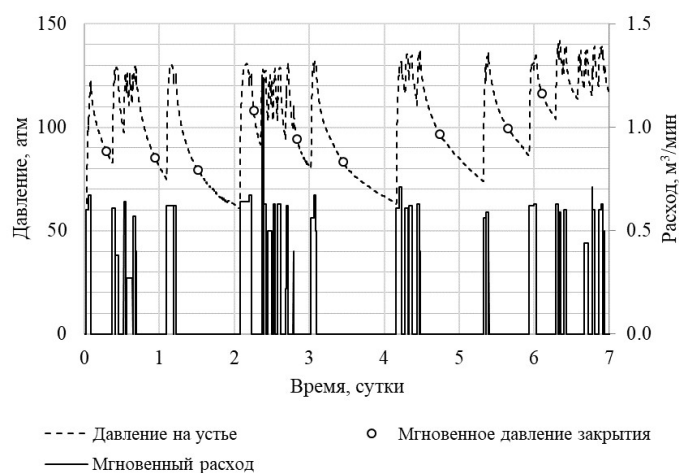


Рисунок 2. Фактические данные циклической закачки

В этих точках определяется мгновенное давление остановки закачки, являющееся наиболее точной оценкой минимального главного напряжения в целевом пласте. Наблюдается общий тренд к повышению давления закрытия трещины в целевом пласте и соответствующему росту минимального главного напряжения в точности с описанной выше концепцией.

Раздел 3.4 содержит в себе результаты моделирования изменений напряженно-деформированного состояния с использованием фактических данных, полученных с одной из скважин, разрабатывающих морское месторождение в акватории острова Сахалин. Описано построение одномерной геомеханической модели скважины с использованием пороупругой модели, представлен прогноз изменения напряжения в целевом пласте по мере продолжения закачки. На рисунке 3 показаны результаты моделирования: сохраняются обозначения рисунка 2, за исключением того, что пунктирной линией показаны результаты моделирования – ожидаемое изменение минимального главного напряжения в пласте с продолжением закачки.

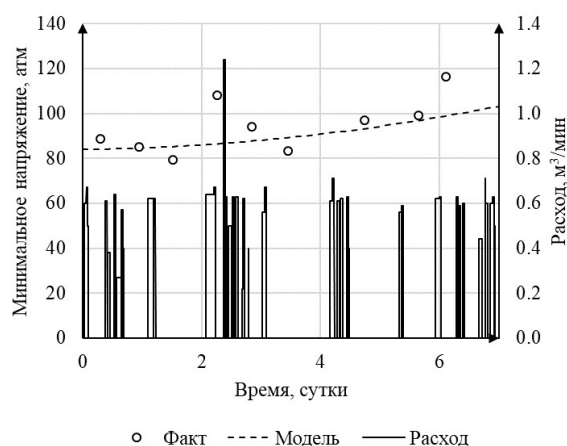


Рисунок 3. Модельные и фактические изменения минимального напряжения в пласте

Основным результатом главы 3 является сформулированный в **разделе 3.5** подход к использованию данных геофизического мониторинга и геомеханического моделирования для того, чтобы устанавливать технический и операционный пределы давления закачки с целью предотвращения прорыва трещины, образующейся при закачке в вышележащие пласты-флюидоупоры. Второстепенным результатом главы является сформулированная прогностическая модель изменения напряженно-деформированного состояния целевого пласта, которая может быть использована для изменения программы закачки или своевременного перехода на другой пласт или проведения капитального ремонта скважины.

В **главе 4** приведены примеры применения разработанного подхода для снижения геологических и экологических рисков при обратной закачке технологических отходов на отдельных объектах. В главе представлены результаты оценки потенциального эффекта, а также результаты геофизического мониторинга, подтверждающие безопасную реализацию утилизации отходов бурения на шельфовых месторождениях, разработка которых осложнена тяжелыми климатическими условиями

В **разделе 4.1** описано применение разработанной программы выбора целевых пластов и мониторинга состояния пластов-флюидоупоров при разработке морских нефтегазовых месторождений. Приведены результаты анализа петрофизических и геомеханических данных для выбора целевого пласта (рисунок 4).

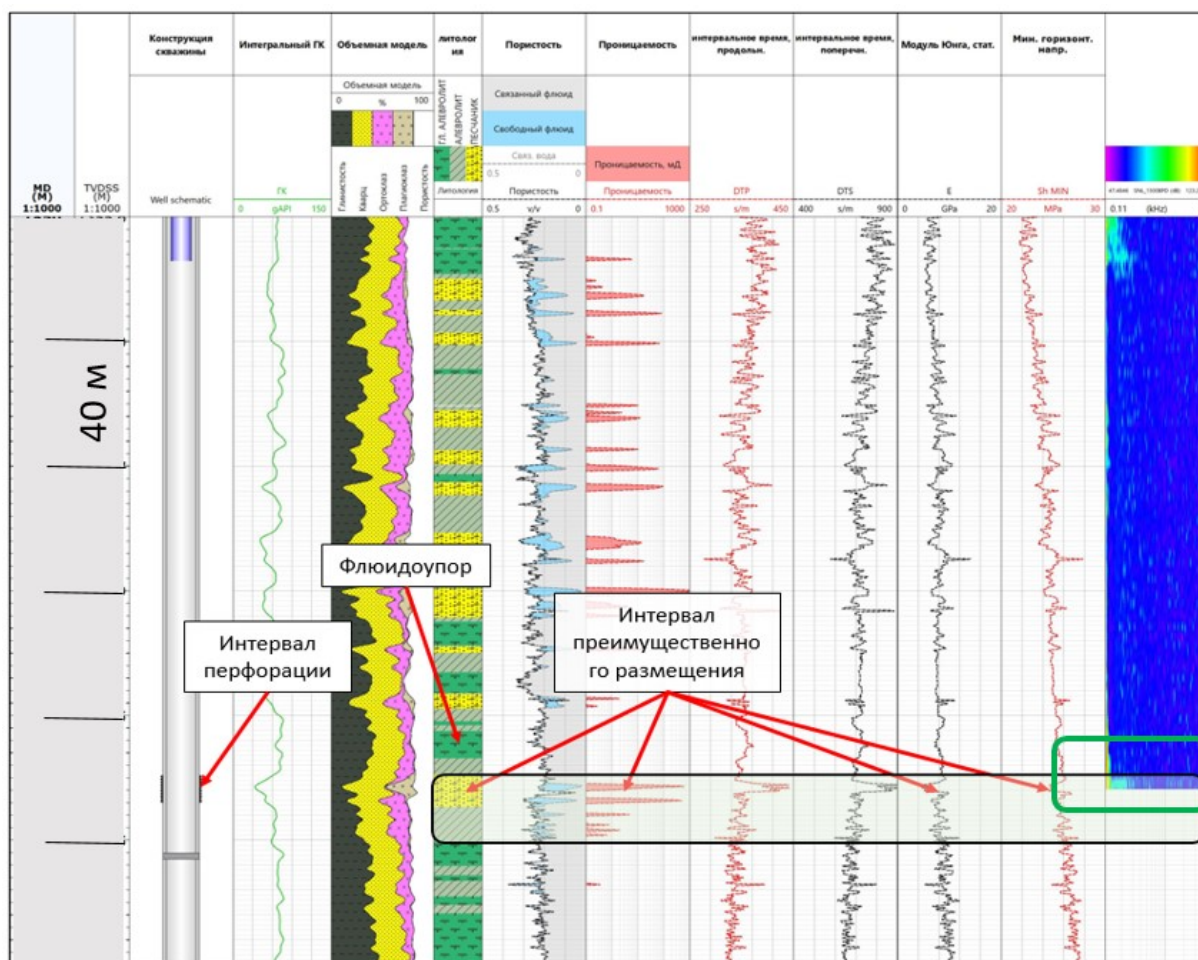


Рисунок 4. Петрофизический и геомеханический планшет

На основании предложенной концепции определения операционных и технологических пределов был разработан электронный модуль, который отображает давление закрытия трещин после закачек и устанавливает операционные и технические пределы (пример отображения на рисунке 5). На примере скважины (рисунок 5) видно, что пласт-домен обеспечивал утилизацию шлама и технологических отходов в течение 12 лет. В 2016 году давление приблизилось к операционному пределу, что потребовало снижения интенсивности закачки, и в последующие циклы давление начало снижаться. В 2018-2019 годах увеличение интенсивности бурения и утилизации шлама привело к окончательному наполнению домена к началу 2020 года, однако прорыва флюидоупора не произошло, что подтверждено результатами комплекса ГИС, включающего спектральную шумометрию. Давление закрытия трещины достигло операционного предела, и скважина была остановлена для капитального ремонта, который был проведен сразу же после модернизации платформы. Во время ремонта осуществлен переход на вышележащий поглощающий домен, и далее была развернута кампания бурения боковых стволов с соответствующим размещением отходов в данной

Специальной Поглощающей Скважине. Увеличилась приемистость скважины, давления закачки и соответственно напряжения в пласте снизились. Таким образом, предложенная концепция сравнения давлений закрытия трещин с операционным (минимальное горизонтальное напряжение в флюидоупоре) и техническим (напряжение развития трещины во флюидоупоре) пределами полностью подтвердилась.

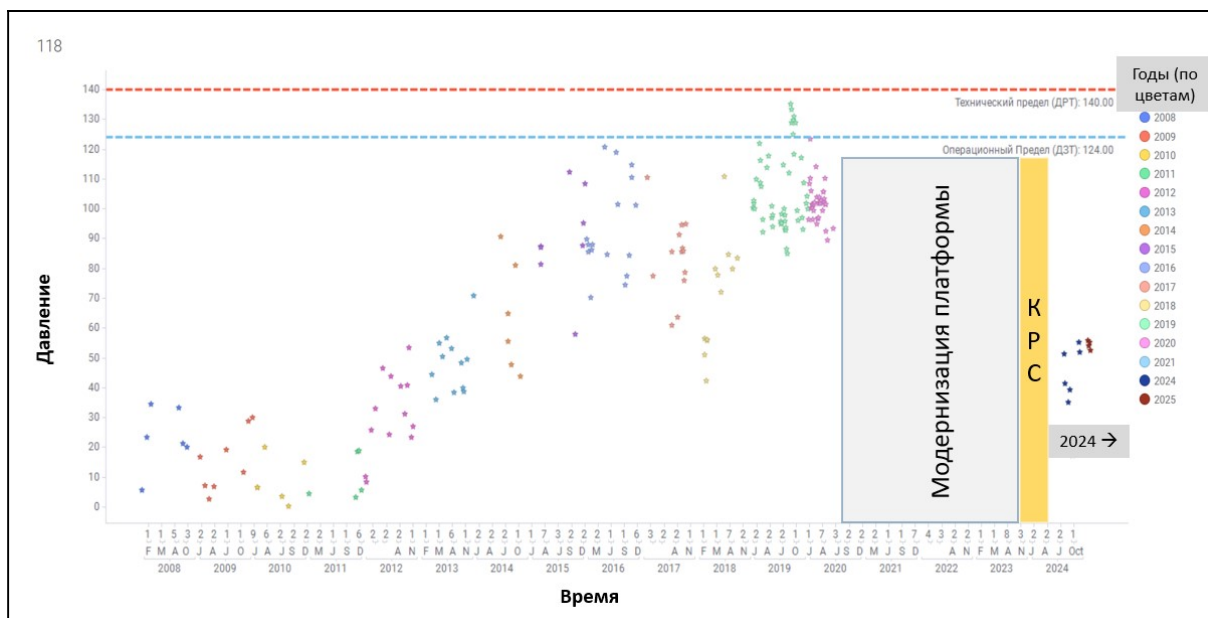


Рисунок 5. График зависимости давлений закрытия трещины от времени и переход на другой домен

В разделе 4.2 представлены результаты сейсмического мониторинга, подтверждающие нахождение системы трещин в целевом пласте-домене. На месторождении организована система сейсмического мониторинга 4D, производятся регулярные сейсмические съемки, что позволяет реализовывать контроль состояния пластов. На основании трансформации петроупругих свойств в пределах пласта в результате разработки, регистрируются изменения параметров сейсмического волнового поля. Характер регистрируемых 4D сигналов дает возможность оценить изменения пластового давления, насыщенности, повышения температуры и развитие зон трещиноватости. Для анализа развития зон трещиноватости используются 4D дифракционные данные, по интерпретации которых локализуется зона трещиноватости. Выделенное направление зоны развития трещиноватости согласуется с направлением максимального горизонтального напряжения, используемого при геомеханическом моделировании, что подтверждает корректность его результатов.

Горизонтальные срезы по кубу дифракций показаны на рисунке 6. Голубым цветом отображена зона повышенного давления, что показывает образование сети трещин с соответствующим наполнением околотрещинной зоны пласта жидкостью. Система трещин и объем с повышенным давлением направлены вдоль максимального главного напряжения и перпендикулярно минимальному.

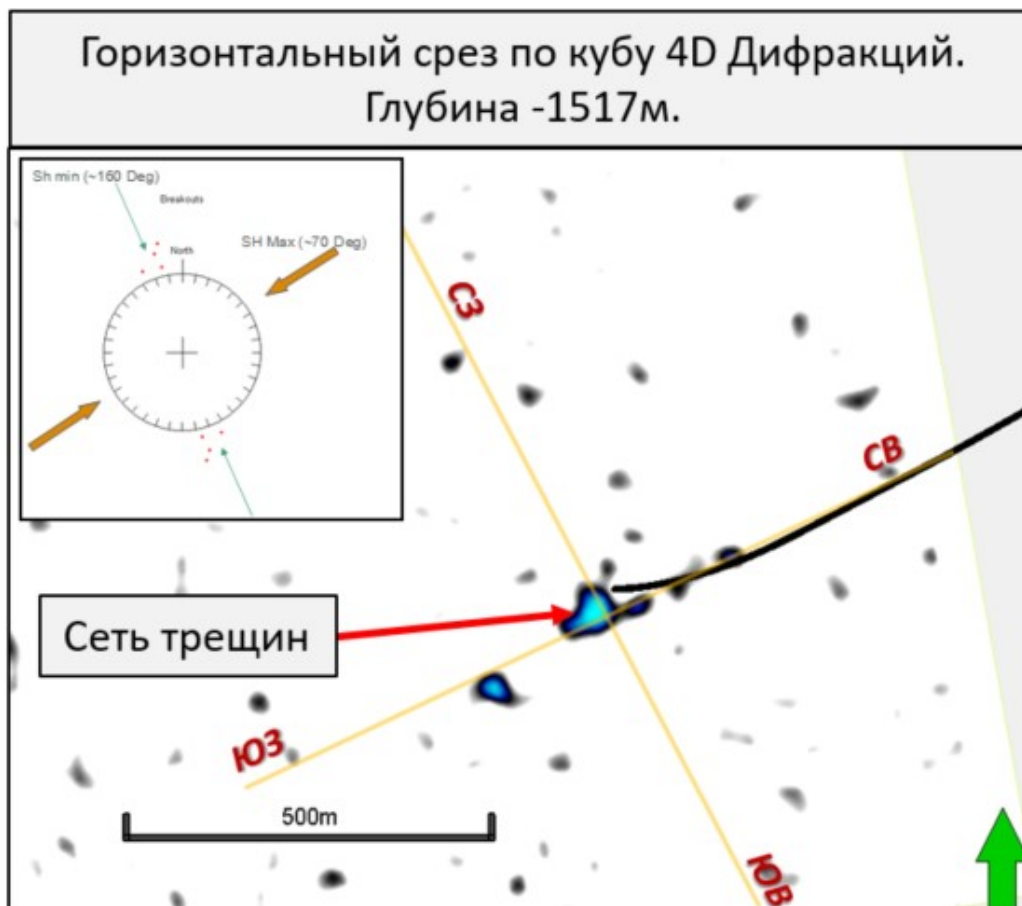


Рисунок 6. Горизонтальный срез по кубу 4D Дифракций, направления главных напряжений.

Вертикальные срезы по кубу дифракций показаны на рисунке 7, где голубым цветом показана зона интенсивного развития трещиноватости в ходе циклической закачки, а сплошными линиями – границы целевого пласта и флюидоупоров. Видна локализация трещиноватости только в целевом пласте, что указывает на нахождение системы трещин в рамках целевого пласта-домена и таким образом подтверждает безопасность реализации технологии размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр.

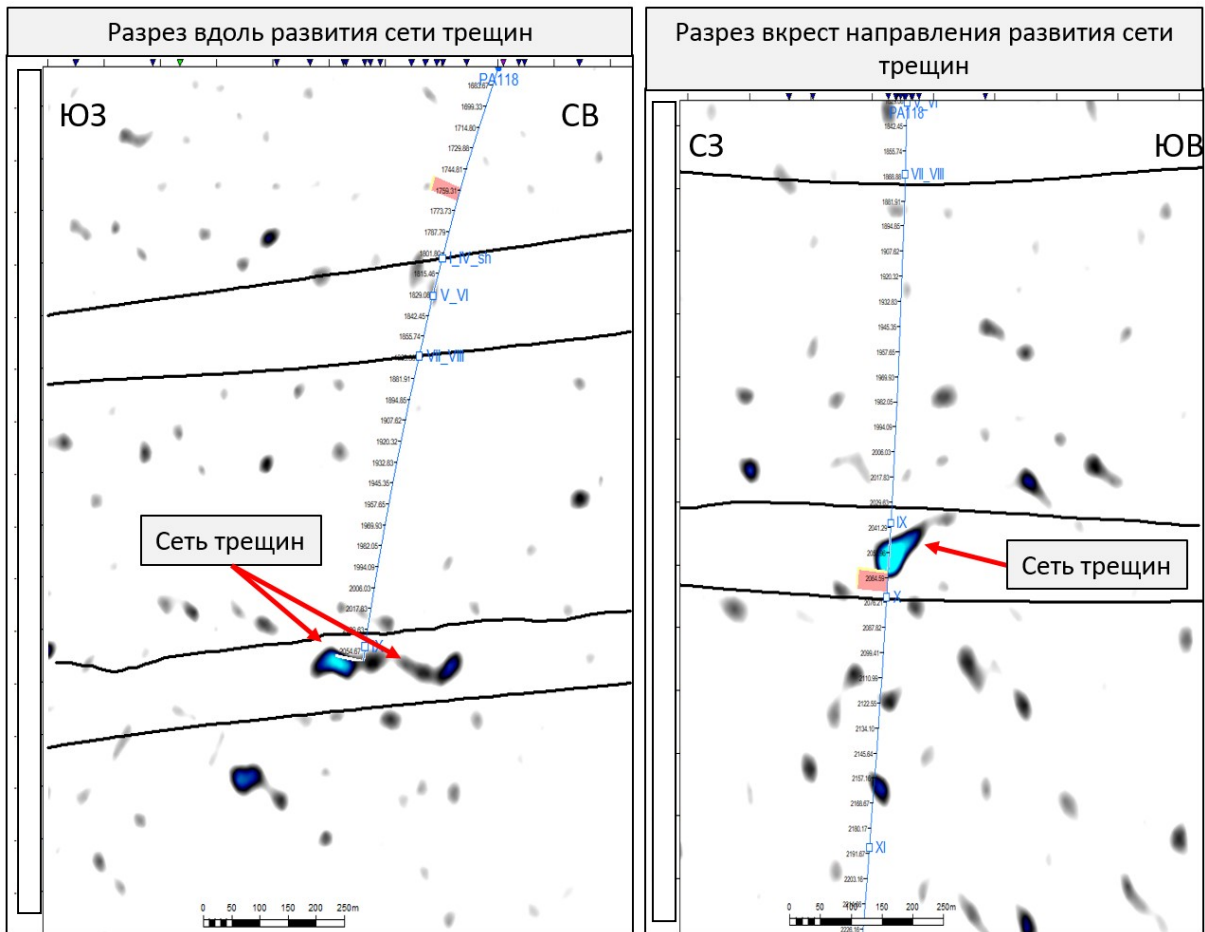


Рисунок 7. Разрезы вдоль и перпендикулярно сети образовавшихся трещин.

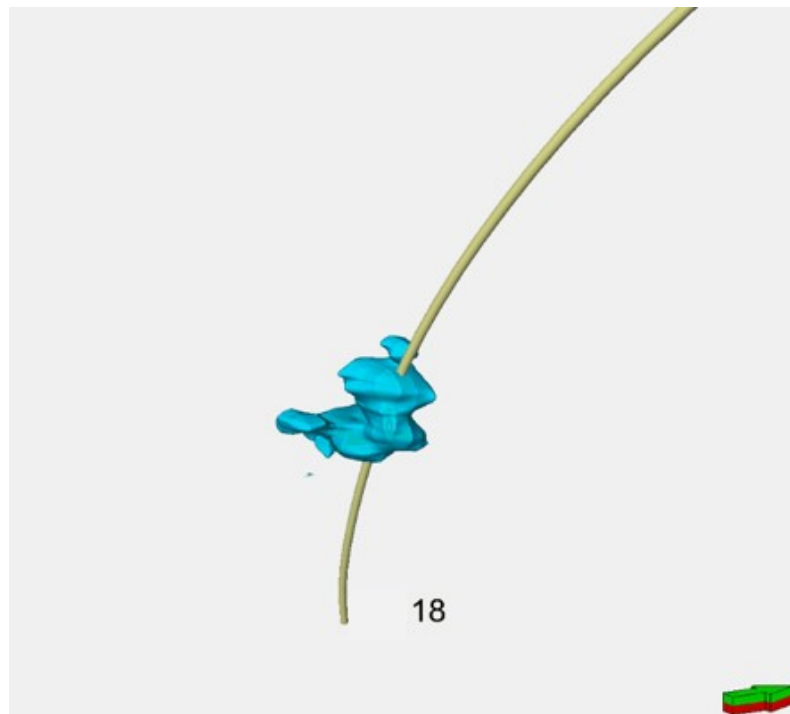


Рисунок 8. Визуализация системы трещин (область повышенного давления).

На основе 4D сейсмических исследований и интерпретации данных построена 3D визуализация системы (область повышенного давления). На визуализации (рисунок 8) видно, что система трещин имеет сложный характер, но в целом подчиняется законам геомеханики, где расположение общей накачанной зоны трещин распространяется вдоль максимального и перпендикулярно минимальному главным напряжением.

В разделе 4.3 обобщены результаты применения технологии обратной закачки на месторождении в акватории острова Сахалин. Продемонстрированные примеры успешного применения технологии обратной закачки отходов бурения и технологической жидкости в пласты домены, сопровождающейся геофизическим и геомеханическим мониторингом состояния пластов флюидоупоров, подтверждают снижение геологических и экологических рисков утилизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был выполнен обзор различных подходов обработки и утилизации отходов бурения. Рассмотрены подходы, реализуемые на различных месторождениях с учетом их специфики. Продемонстрировано, что технология обратной закачки является предпочтительной при освоении и разработке труднодоступных морских месторождений, в частности, месторождений акватории острова Сахалин.

Технология обратной закачки отходов бурения была рассмотрена детально, с анализом всех основных этапов ее реализации. Предложена система комплексного геофизического изучения и мониторинга целевых пластов и флюидоупоров, использование которой позволяет реализовывать технологию обратной закачки с минимумом экологических и геологических рисков.

К важным результатам работы можно отнести создание концепций операционного и технического пределов закачки, а также их обоснование с использованием методов геомеханики. В работе была представлена упрощенная математическая модель, которая позволяет прогнозировать изменение состояния целевого пласта и пластов-флюидоупоров по мере закачки и приближение давления к критическому значению. Разработанная концептуальная и математическая модель процесса позволяет использовать данные мониторинга для прогноза операционных пределов закачки отходов бурения в пласт со снижением геологических рисков.

Разработанная концепция и модель были успешно применены для реализации описываемой технологии обратной закачки. Результаты прямых исследований, а также данные геофизического мониторинга подтвердили эффективность и безопасность применения технологии обратной закачки при разработке шельфового месторождения, характеризующегося сложными климатическими условиями.

Можно рассчитывать на то, что предложенная методология и система мониторинга будут в дальнейшем успешно применены для освоения новых морских месторождений углеводородов, что позволит повысить эффективность топливно-энергетического комплекса, а также снизить геологические и экологические риски, связанные с разработкой таких месторождений в прибрежных акваториях нашей страны.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях перечня ВАК, соответствующих специальности 1.6.9:

1. **Моисеенков А.В.**, Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Хабаров А.В., Береснев А.В., Новикова Е.В., Дубиня Н.В. Геомеханические аспекты вопроса обратной закачки бурового шлама в пласт // Геофизические исследования. – 2024. – № 4. – С. 63–80.

2. **Хабаров А.В., Береснев А.В., Моисеенков А.В.** Особенности геомеханического сопровождения разработки шельфовых месторождений // Геофизика, план.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Береснев А.В., Хабаров А.В., Иванцов И.М., **Моисеенков А.В.**, Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г. Способ захоронения буровых и технологических отходов при эксплуатации нефтегазоконденсатных, нефтяных и газовых месторождений // Патент на изобретение № 2819034, 13 мая 2024 г. Заявка № 2023110197.

2. Алябьев Р.Н., **Моисеенков А.В.**, Каспров Е.В., Колчин В.А., Пенский Л. В., Метальников Р.В., Никитин С.В. Набор страниц графического интерфейса пользователя «Контроль работы поглощающих скважин системы “eWellBook”, используемой при разработке нефтегазоконденсатных месторождений» (изделие в целом) // Патент на промышленный образец № 140105 от 06 января 2023 г. Заявка № 2023500480

Публикации в изданиях перечня ВАК по смежным специальностям:

1. Береснев А.В., Хабаров А.В., **Моисеенков А.В.**, Павлов Д.В., Попов А.А., Тимофеева О.В., Рыков А.П., Облеков Р.Г., Гафаров Т.Н. Мониторинг целостности пластов-флюидоупоров при разработке шельфовых месторождений // Геология и недропользование. – 2023. – № 1. – С. 24–35.

2. Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Марченко А.В., Хабаров А.В., **Моисеенков А.В.**, Береснев А.В. Система контроля за разработкой месторождения и проведения программы геолого-технических мероприятий в рамках проекта «Сахалин-2» // Газовая промышленность. – 2023. – № 10. – С. 26–31.

3. Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Ахметдинов А.М., **Моисеенков А.В.**, Марченко А.В., Сычев О.Г. Основные принципы технологии обратной закачки бурового шлама, используемой для размещения буровых отходов в геологическом объекте // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 11. – С. 138–143.

4. Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Хабаров А.В., **Моисеенков А.В.**, Голушко А.Г., Песоцкий С.А. Примеры комплексного моделирования для решения различных задач в

области геологии и разработки шельфовых месторождений // Газовая промышленность. – 2022. – № 11. – С. 14–22.

5. Дашков Р.Ю., Гафаров Т.Н., Сингуров А.А., Облеков Р.Г., Хабаров А.В., Тарский В.Н., Павлов Д.В., **Моисеенков А.В.** Особенности контроля разработки месторождений с морских платформ // Газовая промышленность. – 2022. – № 7. – С. 28–38.

6. Дашков Р.Ю., Олейников А.А., Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Окишев Р.Н., **Моисеенков А.В.**, Антоненц Э.А., Хабаров А.В., Дудочкин А.В., Меньшиков С.Н., Чужмарев С.С. Управление целостностью скважин на проекте «Сахалин-2» // Газовая промышленность. – 2024. – № 2. – С. 118–123.

7. Марченко А.В., **Моисеенков А.В.**, Парфенов А.М., Хабаров А.В. Особенности программы исследований морских месторождений на примере Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения проекта «Сахалин-2» // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2023. – № 2(41). – С. 216–226.

8. Олейников А.А., Абрамов И.В., Сингуров А.А., Окишев Р.Н., Облеков Р.Г., **Моисеенков А.В.**, Сержанин А.В., Алябьев Р.Н., Береснев А.В. Реализация концепции «нулевого сброса» при разработке шельфовых месторождений на проекте «Сахалин-2» // Газовая промышленность. – 2023. – № 4. – С. 30–34.

Публикации в прочих изданиях:

1. Smirnov D., Al Isae O, **Moiseenkov A.**, Al Hadhrami A., Shabibi H., Kaabi S., Sayapov E. Integrated Hydraulic Fracture Geometry Evaluation Based on Pre-Cambrian Tight Silicylate Reservoir in South Oman Salt Basin // Paper presented at the SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, Muscat, Oman, January 2022.

2. Al Isae O.M., Smirnov D., Al Hadhrami A.M., Alkhatab S.H., Sayapov E., **Moiseenkov A.**, Kaabi S. A Novel Environmentally Friendly, Cost Effective Method for Hydraulic Fracture Geometry Evaluation: Cased Hole Cross-Dipole Data // Paper presented at the SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, USA, April 2022.

3. Al-Yaarubi A., Al Bimani S., Al Rahbi S., Leech R., Smirnov D., **Moiseenkov A.**, Sayapov E., Isae O. Applying Slim Dipole Sonic Tool to Evaluate Hydraulic Fracture Geometry and Orientation Using the Differential Sonic Method. Paper presented at the SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, Muscat, Oman, January 2022.

4. **Moiseenkov A.**, Smirnov D., Al Hadhrami A., Agrawal P., Harrasi A., Manthari M., Busaidi A., Khayrutdinov F., Sayapov E., Isae O. Successful Unconventional Fracturing

Tight and Highly Laminated Silicilyte Reservoir Leading to Economic Field Development // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2021.

5. **Moiseenkov A.**, Smirnov D., Mahajan S., Al Hadhrami A., Al Azizi I., Shabibi H., Balushi Y., Omairi M., Rashdi M. Salt Creeping Effect on Borehole Collapse and Well Completion Design, Based on South Oman Field Experience // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2019

6. **Moiseenkov A.**, Al Hadhrami A., Khayrutdinov F., Al Azizi I., Shabibi H., Manthari M., Melvin K., Ziada A., Rashdi M., Omairi M., Narwal T. Openhole Completions as Recovery Case for Drilling Across Salt and High Pressure Floaters // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2019

7. **Moiseenkov A.**, Al Hadhrami A., Shabibi H., Smirnov D., Busaidi Y., Nabhani Y., Nunez A., Alias Z., Al-Jabri A. Abrasive Jet Perforation: Successful Deployment of Novel Technique to Enhance Production and Promote Savings // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2019.

8. Al Hadhrami A., Al Riyami A., Schulz R., **Moiseenkov A.**, Khayrutdinov F., Smirnov D., Al Kindi N. Hydraulic Fracturing Design to Unlock Light Tight Oil Resources in South Oman // Paper presented at the SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, Muscat, Oman, October 2018.

9. Al Hadhrami A., Al Riyami A., Schulz R., **Moiseenkov A.**, Khayrutdinov F., Smirnov D., Al Kindi N. Roadmap to Unlock Light, Tight and Highly Laminated Oil Resources in South Oman // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2018.

10. Castiblanco R., Ibrahim E.G., **Moiseenkov A.**, Waili I.H., Niyadi F., Al Ramidhi Y., Al Farei I., Nabhani Y., Lukmanov R.B., Al-Hashemi M., Aristov S., Uralsky S., Makhyanov R., Skutin V. Evaluation of Hydraulic Fracturing Effectiveness by Combined Analysis of Spectral Noise Logging and High Precision Temperature Logging Data and Subsequent Numerical Temperature Modelling // Paper presented at the SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, Muscat, Oman, October 2018.

11. Bate K., Lane M., **Moiseenkov A.**, Nadezhdin S. Geological Model Coupled with Geomechanics Makes an Impact on Fracturing Stimulation and Field Development Strategy of a Tight Gas Formation in the Sultanate of Oman // Paper presented at the SPE Middle East Unconventional Resources Conference and Exhibition, Muscat, Oman, January 2015.

12. Briner A., Al-Yarubi S., El-Taha Y.C., **Moiseenkov A.**, Al Alqam A., El Gihani M., Nadezdhin S. Recovering From Spectacular Failure - How In-Depth Root Cause Analysis Led to First Successful HP/HT Microseismic Monitoring in the Sultanate of Oman // Paper presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, December 2015.
13. Briner A., **Moiseenkov A.**, Nadezdhin S., Al Zeidi O., Batmaz T. Successfully Planning Horizontal Well Completions Using Advanced Workflows in a Tight Gas Reservoir in the Sultanate of Oman // Paper presented at the SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, March 2015.
14. Briner A., **Moiseenkov A.**, Prioul R., Abbas S., Nadezdhin S., Gurmen N. Hydraulic Fracture Initiation and Propagation Model Provides Theoretical Ground for Hybrid-Type Fracturing Schedules in Unconventional Gas Reservoir in the Sultanate of Oman // Paper presented at the SPE Middle East Unconventional Resources Conference and Exhibition, Muscat, Oman, January 2015.
15. **Moiseenkov A.**, Briner A., Urquhart M., Harianta R. Six Steps to Successfully Design and Execute Hydraulic Fractures in the Khulud Exploration Area, North Oman // Paper presented at the SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition, Muscat, Oman, January 2013.
16. Dykhno L., Mehta A., **Moiseyev A.V.** Applicability of Flow Assurance Solutions for Russian Oil & Gas Developments // Paper presented at the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, October 2006.

Подписано в печать **??.??** 2025 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ № **????**

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru