

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О. Ю. ШМИДТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.,

Н.В. Дубиня

Москва

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Технологии утилизации отходов бурения	16
1.1 Методы обработки и утилизации отходов бурения	17
1.2 Заключение по главе 1	30
Глава 2. Технология размещения отходов	33
2.1 Основные положения технологии размещения отходов в глубоких горизонтах недр.....	33
2.2 Основные этапы проведения работ для реализации размещения отходов.....	36
2.3 Подготовка проекта	38
2.3.1 Выбор целевого пласта-домена (Минимальный комплекс)	40
2.3.2 Выбор целевого пласта (Оптимальный комплекс)	46
2.4 Операционная стадия закачки	53
2.4.1 Определение потенциальных рисков и мер контроля.....	53
2.4.2 Подготовка шлама, пульпы и закачка в пласт.....	55
2.5 Мониторинг и подтверждение целостности системы.....	57
2.5.1 Промыслово-геофизический контроль за эксплуатацией специальных поглощающих скважин	58
2.5.2 Визуализация процесса мониторинга поглощающих скважин	77
2.5.3 Контроль целостности покрышек флюидоупоров.....	79
2.5.4 Прогнозирование наполнения пластов-доменов.....	82
2.6 Заключение по главе 2	83
Глава 3. Концепция обеспечения целостности флюидоупоров	85

3.1 Технический и операционный пределы.....	85
3.1.1 Определение технического и операционного пределов для специальных поглощающих скважин при закачке бурового шлама и технологических жидкостей	87
3.1.2 Выводы	94
3.2 Постановка задачи и основные положения	95
3.3 Подготовка исходных данных для моделирования	99
3.4 Результаты моделирования	104
3.5 Заключение по главе 3	110
Глава 4. Практическое применение	112
4.1 Реализация концепции операционного и технического пределов с мониторингом давления	112
4.2 Подтверждение безопасности размещения отходов методами сейсмического мониторинга	122
4.3 Выводы по главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128

ВВЕДЕНИЕ

Морские нефтегазовые проекты имеют особую важность для энергетической безопасности страны, поскольку они напрямую взаимосвязаны с комплексным развитием государства и повышением качества жизни всего населения. Добыча углеводородов из недр с помощью инновационных проектов влияет напрямую, как на национальную безопасность, так и на развитие энергетики и транспортной сферы.

Актуальность избранной темы

Проект «Сахалин-2» реализуется в сложных природно-климатических условиях. Лед в Охотском море в районе платформ держится полгода, высота снежного покрова может достигать нескольких метров, муссонный климат служит причиной частых осадков и штормов, на остров каждый год обрушивается около 100 циклонов. При этом Сахалин отличается уникальной природой и богатством воднобиологических ресурсов. На острове множество рек, куда заходят на нерест тихоокеанские лососи. Флора и фауна насчитывает сотни эндемичных и охраняемых видов.

Протяженности скважин, пробуренных с морской стационарной платформы может достигать 10 км и более, (рисунок 1). При бурении и эксплуатации морских месторождений образуется огромное количество отходов бурения и технологических жидкостей, включающие выбуренный шлам, буровой раствор на углеводородной или водяной основе, различные высоковязкие жидкости на полимерных основах, жидкости глушения и заканчивания, консервационные жидкости, дренажные воды, морскую и пластовую воду и другие технологические жидкости производства. Как правило утилизируемые жидкости содержат различные соли и химические реагенты, полимеры, а также могут содержать углеводороды.

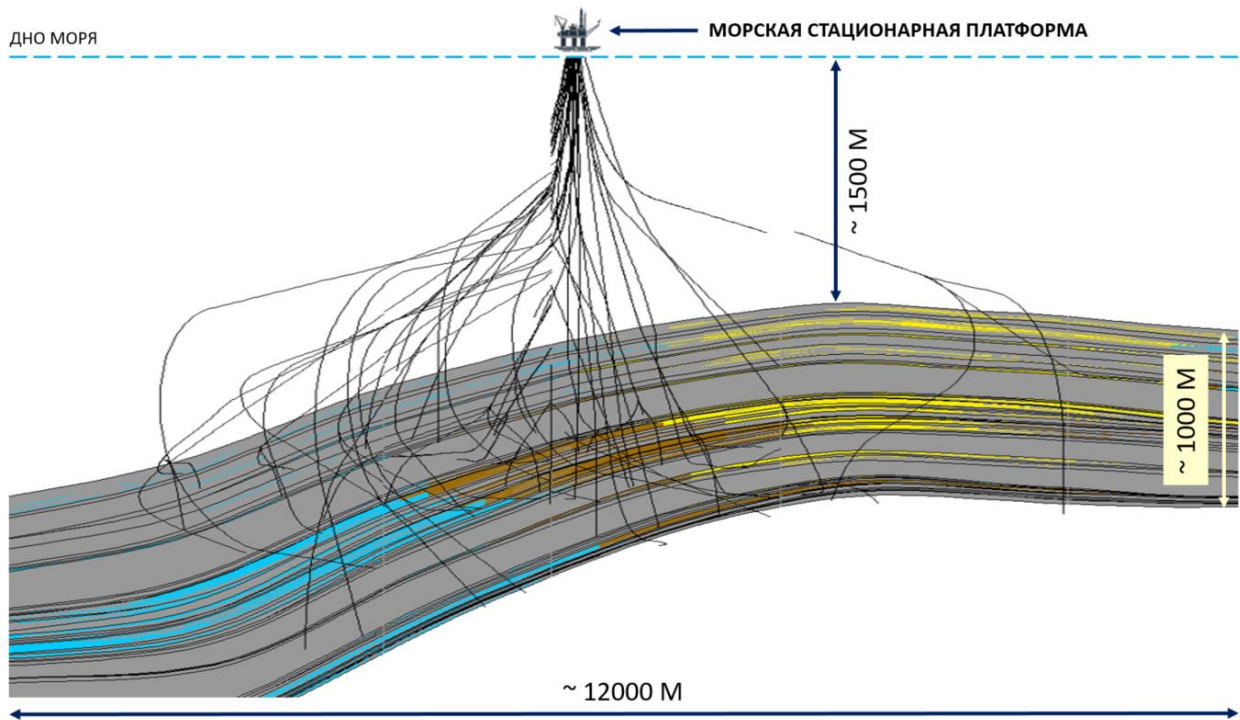


Рисунок 1. Геологический разрез типового месторождения в прибрежной акватории острова Сахалин, схема размещения платформы и скважин.

При принятии решения о бурении скважины, вне зависимости от ее назначения, одним из первых рассматривается вопрос размещения буровых отходов. Особенно важно это для морского бурения, где вопрос экологичности производства стоит на первом месте [Jorissen et al., 2009]. Вплоть до 80-х годов прошлого века буровые отходы сбрасывались в море (при морском бурении) [Ling et al., 2017] или захоранивались на специальных полигонах (при бурении на суше).

Степень разработанности избранной темы

В конце 90-х годов ужесточение экологических норм регулирования выбросов загрязнений наряду с усложняющимися условиями бурения дали толчок к появлению новой технологии размещения отходов бурения и технологических жидкостей путем их обратной закачки в глубокие горизонты недр в принимающий проницаемый пласт-домен [Paulsen et al., 2003], при этом

необходимо должным образом обеспечить целостность покрывающих пластов-флюидоупоров, не допустить прорывов пластов-флюидоупоров и проникновения закачиваемых жидкостей в вышележащие пласты, разломы и прочее. Принимающий пласт-домен на проекте Сахалин-2 является характерным для терригенных пород нутовской свиты миоценового возраста месторождений прибрежной зоны острова Сахалин. На проекте Сахалин-2 пласт-домен характеризуется неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств. Для пород характерна сложная морфология пустотного пространства, включающая микро- и мезопористость, связанная с глинистыми минералами и обломками вулканических пород, а также частичным выщелачиванием плагиоклазов и калиевых полевых шпатов. Породы классифицируются как аркозовые и лититовые арениты. Пласты-флюидоупоры на проекте относятся к окобыкайскому горизонту и распространены на северо-восточном шельфе острова Сахалин повсеместно. Их осадконакопление происходило в условиях углубления дна бассейна. В основном флюидоупоры представлены утончающимися вверх по разрезу глинами, алевролитами и небольшими прослоями песчаника. Глины серые, темно-серые, пластичные, местами алевролитовые. Минеральный состав иллитовый, иллитово-сметтитовый. В значительных количествах содержится также каолинит и хлорит.

Методология и методы диссертационного исследования

Основной темой исследования является новая технология размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр, которая обеспечивает необходимый баланс жестких экологических требований при соблюдении высокой эффективности бурения.

Основным отличием этой технологии является то, что обработка и размещение отходов бурения и технологических жидкостей ведется по мере их образования и не требует изъятия из оборота больших площадей земли для

создания полигонов для захоронения отходов, а также отсутствует необходимость осуществления сложных морских логистических операций для обеспечения регулярного вывоза отходов [Ling et al., 2017]. Это позволяет не только решить проблему хранения и транспортировки, но и обеспечивает возможность для круглогодичного бурения. Что особенно актуально, учитывая островное расположение, географическую удаленность Сахалина от основной инфраструктуры, специфические ледовые условия Охотского моря и многообразие морского животного мира в его акватории.

Главным преимуществом этой технологии в отличие от традиционных методов обращения с буровыми отходами является полное отсутствие негативного воздействия на окружающую среду [Ling et al., 2017]. Закачка в пласт исключает размещение буровых отходов на поверхности и их контакт с окружающей средой, в том числе с подземными водоносными горизонтами. На сегодняшний день это одна из наиболее инновационных, экономически выгодных и экологически чистых мировых практик. В России эта технология впервые была применена в 2004 году, именно на проекте «Сахалин-2» на платформе «Моликпак».

Технология закачки в глубокие горизонты недр обеспечивает полную локализацию и надежное захоронение отходов бурения, и технологические жидкости образующиеся в процессе эксплуатации нефтегазовых месторождений и добычи углеводородов. Это подтверждается данными постоянного мониторинга, который «Сахалинская Энергия» ведет в районах подземного размещения отходов. Состояние морской воды, донных отложений и бентосных сообществ здесь находится в норме на протяжении всего срока подземного размещения отходов.

В рамках цикла работ разработаны уникальные технико-технологические решения по обеспечению системного подхода к проведению мониторинга и контроля за целостностью покрышек-флюидоупоров при

размещении отходов бурения и технологических жидкостей, включающих шлам образованный при бурении скважин, остатки неиспользованных химических реагентов, бытовые отходы производства, технологические отходы из сепараторов, емкостей, трубопроводов, и других элементов поверхностного производственного комплекса по добыче, подготовке и переработке и нефти и газа [Poclin et al., 2015].

Полученные уникальные технико-технологические решения по обеспечению системного подхода к проведению мониторинга и контроля за целостностью покрышек-флюидоупоров включают в себя установление пределов наполнения доменов, технического и операционного пределов на основе физических свойств покрышек-флюидоупоров (барьеров).

Цель работы

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

Основные задачи исследования

1. Обзор современного состояния технологий и методик утилизации отходов бурения и технологических жидкостей 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 размещения отходов бурения и технологических жидкостей в пласты домены.

3. Разработка системы геофизического мониторинга состояния пластов-доменов и пластов-флюидоупоров для контроля динамики их состояния в ходе проведения размещения отходов.
4. Создание концептуальной системы принятия решений по условиям размещения отходов бурения и технологических жидкостей, 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 и уникальной природой острова Сахалин - с целью реализации технологии размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр с минимумом геологических и экологических рисков.

Научная новизна работы

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 размещении отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр. Предложенная концепция технического и операционного пределов при обратной закачке в недра, является уникальной и позволяет принимать обоснованные решения

при контроле условий размещения отходов на основании установленных операционных и технических пределов, полученных в результате анализа комплекса геофизических данных, для достижения максимально безопасного и экономически эффективного уровня утилизации отходов бурения и технологических жидкостей в условиях морских месторождений углеводородов.

Защищаемые положения

1. Система комплексного геофизического мониторинга позволяет реализовать программу размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр с минимизацией геологических и экологических рисков в условиях труднодоступных морских месторождений.
2. Размещение буровых и технологических отходов в подземных пластах доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров является передовой технологией утилизации отходов при разработке месторождений в прилегающей акватории острова Сахалин.
3. Концептуальная модель условий прорыва пласта-флюидоупора позволяет использовать данные мониторинга для прогноза наполнения домена и достижения операционных пределов при закачке отходов бурения и технологических жидкостей в пласт со снижением геологических и экологических рисков.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная система комплексного геофизического мониторинга для контроля состояния пластов флюидоупоров в ходе размещения отходов бурения и технологических жидкостей путем из закачки в пласты-домены, 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 бурения и технологических жидкостей с минимизацией геологических рисков, а также с предупреждением экологических катастроф.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 146 страниц, 27 рисунков, две таблицы и список литературы из 112 наименований.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

Материалы диссертации основаны на опубликованных соискателем научных работах и полученных результатах интеллектуальной деятельности: главы 1 и 2 подготовлены на основании работ: Береснев и др., 2023, Гафаров и др., 2023, Марченко и др., 2023, Олейников и др., 2023, Сержанин и др., 2022. Глава 3 основана материалах статьи Моисеенков и др., 2024. Отдельные результаты, продемонстрированные в главе 4, получены с использованием

программного обеспечения, зарегистрированного как: 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.

Личный вклад

Результаты работы, полученные лично соискателем в ходе проведения исследования, включают: выполнение обзора литературы применяемых технологий утилизации различных видов отходов, обоснование оптимальности технологии размещения отходов бурения и технологических жидкостей 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, формулировку упрощенной математической модели установления пределов и прогнозирование наполнения пластов-доменов. Создание программного комплекса для отслеживания режимов размещения отходов бурения и технологических жидкостей, оформлением и получением двух патентов, составление и реализация комплексов геофизических исследований, включающих геофизические исследования скважин (ГИС) и интерпретация 4D-сеймики для подтверждения концептуальной модели наполнения пластов-доменов и целостности пластов-флюидоупоров. 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, разработаны 2 объекта интеллектуальной собственности. Результаты работы представлены на отраслевых научно-практических конференциях: Актуальные вопросы экспертизы геологических и извлекаемых запасов УВС, февраль 2023, г. Москва, ФБУ «ГКЗ», Международный форум «Экология», Центр содействия природоохранным инициативам «Экология», июнь 2023, г. Москва., Международная конференция «Подземные сооружения-2024», август 2024 г., ФБУ «ГКЗ» при поддержке Роснедра и Европейского Союза Экспертов по Недропользованию (ЕСОЭН).

Работа автора на тему: «Разработка и внедрение уникальной технологии контроля размещения отходов бурения и технологических жидкостей при разработке шельфовых месторождений нефти и газа основанная на научных результатах, изложенных в диссертации, получила премию ПАО «Газпром» в области науки и техники за 2023 год (2 место).

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.О. Баюк и Е.В. Новикову за ценные методические советы при подготовке диссертации. Сотруднику ООО «Литосфера» Я.И. Юсупову, за помощь в построении 1D геомеханической модели.

Ученым, внесшим вклад в развитие геомеханики: В. Родионову, С. Христиановичу, Q. Guo, M. Prats, M. Zoback и другим исследователям механики горных пород; ученым, внесшим вклад в развитие геофизической науки: А.И. Заборовскому, Е.К. Блиновой, А.Г. Колесникову, О.Ю. Шмидту, Г.А. Гамбурцеву и другим ученым без работ которых было бы невозможно мое исследование.

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».

Глава 1. Технологии утилизации отходов бурения

Разработка месторождений углеводородов неизбежно сопровождается образованием значительного количества отходов, связанных с бурением скважин. Буровые растворы, используемые для стабилизации скважин, и побочные смеси, состоящие из различных жидкостей и суспензий, активно применяются в процессе бурения скважин и эксплуатации морских стационарных платформ [Razmgir et al., 2011]. Уже на этапе их использования возникает необходимость в переработке и утилизации этих веществ, что требует учета их негативного воздействия на экосистему [Jorissen et al., 2009]. Проблема отходов бурения стала актуальной с середины 1970-х годов, когда научное сообщество впервые обратило внимание на экологические последствия неконтролируемого обращения с такими отходами [McAuliffe, Palmer, 1975]. Особенно остро эти последствия проявляются при бурении на шельфе, где отсутствие должной переработки отходов наносит значительный ущерб окружающей среде [Jorissen et al., 2009].

Контроль за переработкой и хранением отходов бурения на морских проектах регулируется государственными министерствами и ведомствами организациями, которые разрабатывают требования и методики для минимизации экологических рисков. Интерес к этой проблеме значительно возрос на рубеже XX и XXI веков, когда были предложены новые методы переработки отходов и разработан аналитический аппарат для оценки их эффективности. В отчете International Association of Oil & Gas Producers [OGP, 2003] подробно рассмотрены экологические риски, связанные с утилизацией отходов на основе неводных растворов [Paulsen et al., 2003]. Исследование [Melton et al., 2004] описывает катастрофические последствия прямого сброса отходов в акваторию, подчеркивая их долгосрочное и практически необратимое воздействие на морские и прибрежные экосистемы.

Недопустимость таких последствий отражена в международных и национальных нормативных актах, включая документы OSPAR (2000), USEPA (2001), Shell (2007), IPIECA и OGP (2009), а также Petronas (2014). В России состояние нормативной базы в этой области анализируется в работе [Коршунова, Логинов, 2019]. Требования к утилизации отходов варьируются в зависимости от региона и опыта применения буровых технологий. Например, в Северном море и Норвегии разрешен сброс бурового шлама после его обработки, при этом содержание нефти в шламе не должно превышать 1% [Ismail et al., 2017]. Однако в большинстве случаев утилизация осложняется из-за токсичности отходов и их потенциального воздействия на морскую среду.

1.1 Методы обработки и утилизации отходов бурения

В работах [Pereira et al., 2022, Т.Н. Гафаров и др., 2023] представлен детальный обзор современных методов обработки и утилизации отходов бурения. Авторы описывают ключевые подходы, выделяют их преимущества и недостатки, а также оценивают влияние на окружающую среду.

Размещение на полигонах на суше - это один из наиболее распространенных методов утилизации буровых отходов и технологических жидкостей, которые не могут быть переработаны или уничтожены другими способами. Полигоны для опасных отходов проектируются и эксплуатируются с учетом строгих экологических и технических требований, чтобы минимизировать воздействие на окружающую среду и здоровье человека [John Pichtel, 2014.].

Плюсы данной технологии — это безопасность при размещении в специально отведенных и спроектированных полигонов с необходимыми мерами защиты и контроля, также относительная экономичность при

разработке месторождений углеводородов на суше и не сложной логистике [Ling et al., 2017].

Главный минус технологии размещения на полигонах в условиях морских месторождений или месторождений заполярья это логистика, которая является крайне сложной и дорогой. Часто приходится вывозить отходы на полигоны, устроенные в более южных регионах, где отсутствует вечная мерзлота. Отсутствие логистической и транспортной инфраструктуры только усугубляет ситуацию. Некоторые компании не приступают к проектам разработки разведанных месторождений по причине сложности, дороговизны или невозможности утилизировать отходы бурения и технологические жидкости.

Потенциальное влияние на окружающую среду заключается в возможностях утечки фильтрата и загрязнению грунтовых вод из-за намкания после природных осадков, при нарушении ограждающих барьеров или подстилающего основания. Также происходят выбросы в атмосферу вредных газов, которые в свою очередь образуются из-за разложения складированных веществ и их взаимной реакции. Такие выбросы исключить практически невозможно.

Технология биологической деградации отходов — это процесс разложения органических отходов под действием микроорганизмов (бактерий, грибов, простейших) и других биологических агентов (например, дождевых червей, насекомых). В результате этого процесса сложные органические соединения превращаются в более простые вещества (воду, углекислый газ, метан, гумус и минеральные соли). Технология подробно описана в работах [Fan et al., 2012; Agwu et al., 2013; Chen et al., 2015; Imam et al., 2019]. Основные виды биодegradации – это аэробное, которое происходит с участие кислорода, например, на открытом воздухе и анаэробное, соответственно без участия кислорода в закрытых биогазовых реакторах.

Технология биологической деградации в основном используется для биоразлагаемых отходов, таких как пищевые отходы, натуральные материалы, дерево, бумага и прочее. Для не биоразлагаемых материалов, таких как химические реагенты, металл, стекло, пластики, синтетические полимеры и др., такая технология деградации не подходит. В буровом растворе часто применяются различные химические реагенты, синтетические полимеры. Выносимый шлам в виде выбуренной породы также не подходит для биоразложения. Технологические жидкости, состоящие из замывов емкостей содержать остатки химических реагентов и небольшой процент углеводородов. Эти жидкости очень тяжело поддаются биологическому разложению. Таким образом эта технология является неприменимой для размещения отходов бурения и технологических жидкостей.

Плюсы технологии биоразложения - это низкая стоимость, возможность обработки больших объемов, высокая степень очистки.

Минусы технологии – это длительное время обработки, разложение только биоразлагаемых материалов, низкая эффективность всего процесса, дальнейшая необходимость утилизации побочно образованных газов, жидкостей и твердых частиц. Риск влияния на окружающую среду в виде загрязнения воздуха и подземных вод также остается.

Технология физико-химической обработки отходов и различных материалов заключается в использовании химических реакций и физических процессов для очистки – описана в работах [Zhu et al., 2011; Zhu et al., 2014; Tang, Xie, 2017; Pereira et al., 2019]. Основа технологии заключается в физическом разделении отходов по типам (отдельно металлы, стекло, пластик, биоразлагаемые отходы и др.) и дальнейшего химического или физического воздействия, например, таких как химическая нейтрализация, окисление/восстановление, пиролиз, криогенное дробление, плазменная обработка, ионных обмен и прочее. Такого вида обработка отходов является

сложновыполнимой в условиях ограниченного пространства на морских стационарных платформах также нерациональна для использования в полярных широтах ввиду сложности и высокой энергоемкости.

Плюсами физико-химической обработки отходов являются высокая эффективность, возможность полной обработки всех образовавшихся отходов.

Минусами технологии являются высокая стоимость при больших объемах, большие трудозатраты и значительное потребление энергии.

Влияние на окружающую среду достаточно ограничено, вредные выбросы практически отсутствуют.

Технология переработки отходов путем перевода их в жидкое состояние и дальнейший перевод жидкости в сверхкритическое состояние с помощью использования высоких давления и температуры для выделения углеводородов описана в работах [Street et al., 2009; Khanpour et al., 2014; Ma et al., 2019]. Суть технологии заключается в переводе вещества в сверхкритическое состояние вещества, при котором исчезает граница между жидкостью и газом, с дальнейшим окислением, дальнейшей очисткой или извлечением ценных компонентов.

Плюсы данной технологии заключаются в высокой эффективности переработки, полном уничтожении опасных отходов, таких как отравляющие вещества, пестициды, фармакологические отходы, отсутствии вредных выбросов в атмосферу и получении на выходе чистой воды и минерального остатка.

Минусы заключаются в крайне высокой стоимости, высокой технологичности, требующей специального сложного оборудования и высокой квалификации вовлеченных работников, и сложности реализации в условиях морских месторождений нефти и газа и полярных широт.

Влияние на окружающую среду крайне ограничено из-за отсутствия вредных выбросов.

Электрокинетическая обработка отходов [Adhami et al., 2021] — это технология очистки и переработки (особенно жидких и загрязнённых грунтов), основанная на воздействии постоянного электрического тока. В результате возникают электрохимические и физико-химические процессы, приводящие к миграции загрязняющих веществ, изменению рН жидкости, электролизу воды и, в конечном итоге, коагуляции и осаждению твердой фазы. В свою очередь захоронение осажденной твердой фазы требует дополнительного размещения. При больших объемах именно твердой фазы в отходах бурения данная технология не применима для морских месторождений, где требуется полное захоронение (размещение) отходов.

Плюсами данной технологии являются отсутствие побочных продуктов и экологическая чистота.

Минусами являются сложность реализации, высокие энергозатраты, образование вторичных отходов с твердой фазой и применение дополнительной технологии для захоронения именно твердой фазы отходов.

Влияние на окружающую среду минимальное, что является перспективной технологией для других видов утилизации отходов.

Стабилизация (солидификация) – перевод отходов в твердое, малоподвижное состояние [Al-Ansary, Al-Tabbaa, 2007; Leonard, Stegemann, 2010; Boutammime et al., 2020] путем связывания отходов в твердой матрице для предотвращения их миграции в окружающую среду. Данная технология применяется в основном для фиксации токсичных металлов и радиоактивных отходов, также для уменьшения механизма выщелачивания опасных компонентов. Из-за больших объемов отходов бурения и технологических жидкостей, применение данной технологии на морских месторождениях нерационально и вряд ли применимо.

Плюсы данной технологии – простота реализации, низкая стоимость, возможность дальнейшего использования связанных отходов.

Минусы заключаются в сложности утилизации всех компонентов одновременно и большого объема конечного продукта.

Влияние на окружающую среду возможно из-за нарушения связывающего вещества и высвобождения отходов. Неправильная утилизация конечных затвердевших отходов может нанести вред экосистемам.

Технология термической обработки отходов – сжигание их при высоких температурах [Robinson et al., 2009; Mkraoro et al., 2015; Hou et al., 2018; Daneshfar, Ardjmand, 2020] - позволяет уменьшить объем отходов, обезвредить опасные компоненты и получить дополнительную энергию или полезные продукты. При сжигании отходов бурения образуется сухая смесь из выбуренного шлама и остаточных химических реагентов.

Плюсы технологии заключаются в значительном уменьшении объема отходов.

Минусы – это то, что такая технология часто требует предварительной обработки отходов (сушка, удаление воды), что требует значительных дополнительных энергозатрат. При сжигании образуются побочные продукты, такие как токсичные дымовые газы (CO_2 , H_2O , SO_x , NO_x , HCl) и твердая фаза, содержащая в том числе соли металлов, золу. Твердая фаза также в дальнейшем требует утилизации, что для морских проектов является критическим.

Технология размещения отходов в соляных кавернах – отдельное специализированное направление в области утилизации отходов. Соляные каверны (полости, созданные в соляных пластах) используются для безопасного захоронения отходов благодаря их высокой устойчивости к химическим воздействиям и низкой проницаемости [Ronald B. Stone. 1987].

Плюсы – это относительно недорогой способ размещения, герметичность, изоляция от биосферы. Контроль наполнения происходит по фактическому наполнению.

Минусы - это то, что объемы размываемых каверн ограничены, требуется создание большого количества скважин с размывом таких каверн. Такой способ не применим в условиях разработки морских месторождений углеводородов по геологическим причинам ввиду, как правило, отсутствия значительного слоя соли и ввиду невозможности бурения значительного количества скважин.

Несмотря на преимущества, захоронение отходов в соляных кавернах может иметь негативные последствия и негативное влияние на окружающую среду. Если даже технология не соблюдается должным образом, то все равно происходит образование коррозионных рассолов, способных повлиять на целостность скважин с вытеканием размещенных отходов вдоль ствола скважины, и потенциальное загрязнение пресных приповерхностных вод и вплоть до выхода рассолов на поверхность. Влияние сейсмической активности может нарушить герметичную систему, что приведет к выходу опасных загрязненных рассолов.

Размещение в многолетнемерзлых породах – это захоронение отходов в многолетнемерзлых породах (криолитозоне), является одним из методов утилизации, особенно в регионах с суровым климатом, таких как приполярные северные широты. [Э.Ю. Галактионов и др. 2010]

Плюсы такой технологии заключаются в относительной простоте и дешевизне размещения. Низкие температуры обеспечивают естественное охлаждение и замедление биологического процесса разложения, происходит достаточная изоляция, стабильность и контроль наполнения системы.

Минусы данной технологии очевидным образом начали проявляться в последние годы. Захоронение отходов в многолетнемерзлых породах может иметь негативные последствия, особенно в условиях изменения климата. Таяние вечной мерзлоты приводит к разгерметизации системы, что неизбежно приведет к загрязнению грунтовых и поверхностных вод. Загрязнения в свою

очередь приведут к нарушению чувствительных экосистем приполярной зоны планеты. Также отмечаются крайне ограниченные объемы размываемых каверн. Для этого требуется создание большого количества скважин с размывом данных каверн. Такой способ не применим в условиях разработки месторождений углеводородов на море, ввиду отсутствия вечной мерзлоты на дне мирового океана.

Размещение отходов в подземных пластах с контролем по наблюдательным скважинам - эта технология, которая позволяет безопасно утилизировать промышленные, буровые и опасные отходы в глубоких недрах земли. Наблюдательные скважины используются для мониторинга состояния пластов, давления, температуры и состава флюидов, что обеспечивает контроль за процессом и минимизацию рисков для окружающей среды.

Плюсы заключаются в относительной безопасности. Контроль флюидоупоров происходит по наблюдательным скважинам.

Главные минусы этой технологии заключаются в реактивном контроле: прорыв флюидоупора обнаруживается в наблюдательных скважинах постфактум, когда флюидоупор уже поврежден и открывается путь для потенциальных утечек наверх. В данной технологии необходимо наличие второго (запасного) флюидоупора. Также данная технология не применима для использования на морских месторождениях, ввиду невозможности бурения большого количества наблюдательных скважинах.

Негативное воздействие на окружающую среду может произойти при прорыве флюидоупоров с дальнейшим проникновением (выходом) опасных (токсичных) отходов вплоть до морского дна или на дневную поверхность с соответствующим загрязнением приповерхностных вод, окружающей флоры и фауны.

Большинство методов переработки отходов бурения требуют сложного оборудования, что предъявляет высокие требования к инфраструктуре. Это

особенно актуально для морских месторождений, где объемы отходов могут достигать 1000–5000 м³ на одну скважину [Rana, 2008]. На проекте «Сахалин-2» при бурении скважин с отклонением от вертикали до 10 км, отходы достигают десятки тысяч кубических метров на одну скважину. В таких условиях выделенные методы можно отнести к одной из двух групп: метод “Skip and Ship” (отгрузка отходов на сушу в специальных контейнерах – «скипах» - для последующей переработки) и захоронение отходов на месте [Kirkness, Garrick, 2008; de Almeida et al., 2017; Vadinal et al., 2019]. Выбор метода зависит от инфраструктуры, расстояния до суши, наличия достаточного количества кораблей для вывоза, климатических условий.

Для российских морских месторождений северных широт и Дальнего Востока предпочтительной является технология размещения отходов в глубокие горизонты недр, тогда как на Каспийском шельфе возможна переработка на суше [Cherprovitsyn, Lebedev, 2023]. Авторы предлагают ветвь принятия решений, основанную на ответах на ключевые вопросы:

- используется ли водная основа при бурении?
- существуют ли специальные нормативные акты?
- оправдана ли переработка на суше экономически, и существует ли доступ к таковой?
- каковы климатические и геологические условия в месте реализации проекта?
- какова величина затрат на бурение специальных поглощающих скважин?
- каковы инфраструктурные и логистические возможности?

На основе этих факторов рекомендуется выбирать между сбросом отходов в акваторию, отгрузкой на сушу, размещением в пласты-домены или термомеханической обработкой [Kazamias et al., 2021].

В контексте устойчивого и безопасного производства рассматриваются три аспекта: экологический, экономический и социальный. Хотя экономический анализ часто доминирует, количественная оценка экологических и социальных аспектов остается на ранней стадии [Singh et al., 2012]. В работе [de Almeida et al., 2017] предложен математический аппарат для оценки эффективности методов утилизации, включая такие метрики, как энергетическая и карбоновая интенсивность, выбросы парниковых газов, водяная интенсивность, стоимость, риски для персонала и уровень готовности технологии.

Выбор технологии обусловлен факторами применимости при разработке морских месторождений углеводородов, безопасности процесса, включая обеспечение целостности поверхностного оборудования, скважин и флюидоупорных покрышек, экологичности, экономичности и непрерывности процесса размещения отходов для обеспечения одновременного бурения и эксплуатации скважин. В связи с этим, технологии утилизации, захоронения и размещения отходов объединены в таблице 1.1, где представлены результаты сравнения. Для оценки и дальнейшего сравнения применен метод оценки для каждого перечисленного метода по условной 10-бальной шкале, с шагом в 5 баллов, где 0 баллов означает, что технология не применима, 5 баллов - частично применима или применима с ограничениями, и 10 баллов - полностью применима. В последней строке установлена общая сумма баллов.

Основное внимание уделено их применимости, экологическим рискам, логистическим сложностям и экономической эффективности. Каждый метод был специальным образом оценен: была предложена метрика, сформированная на основе изучения литературных источников и качественного анализа отдельных наиболее важных аспектов при реализации в условиях разработки морских месторождений.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАЗМЕЩЕНИЯ БУРОВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ												
ТИП РАЗМЕЩЕНИЯ	РАЗМЕЩЕНИЕ НА ПОЛИГОНАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ	БИОЛОГИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ	ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	ПЕРЕВОД АКТИВНОСТИ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ	ЭЛЕКТРОНИТЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	СТАБИЛИЗАЦИЯ (СОЛИДИФИКАЦИЯ)	ТЕРАПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ (СЖИГАНИЕ, ПИРОЛИЗ И ПР.)	РАЗМЕЩЕНИЕ СОЛЯНЫХ КАВЕРНАХ	РАЗМЕЩЕНИЕ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ	РАЗМЕЩЕНИЕ В ПОДЗЕМНЫХ ПЛАСТАХ ДОМЕНАХ С КОНТРОЛЕМ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ СКВАЖИНАМ	РАЗМЕЩЕНИЕ В ПОДЗЕМНЫХ ПЛАСТАХ ДОМЕНАХ С ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ + ФЛЮИДУОПОР	
ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ	Прочные ограждения и непроницаемые обваловки	Да									По окружающим наблюдательным скважинам (реактивно)	Сравнение напряжений в пласте и флюидоупоре
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	Возможно загрязнение грунтовых вод	Да					Выброс сгоревшей твердой фазы в море	Да		Реактивная реакция после прорыва флюидоупора	Да	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА/БУРЕНИЯ	Длительная и сложная логистика	Нет					Да					
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ	Да									Нет	Да	
ПЕРЕРАБОТКА/РАЗМЕЩЕНИЕ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ В КРАТКИЕ СРОКИ	Да	Нет					Да					
ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ В СЕВЕРНЫХ ШИРОТАХ	Возможно, но требует больших затрат на обустройство полигонов или сложную логистику	Возможно, но требует больших затрат на обустройство					Да	Нет. Отсутствие соляных доменов в Арктике	Да	Возможно, но требует большого количества скважин	Да	
ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ	Длительная и сложная логистика	Нет. Ввиду ограниченного или полного отсутствия пространства платформ, ПДК или Блок-Кондукторах					Возможно при достаточном пространстве для установки	Нет возможности бурить большое количество скважин			Да	
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АХОРОНЕНИЯ ДРУГИХ ВИДОВ ОТХОДОВ	Да	Нежелательно	Нет					Нежелательно		Нет	Да	
БОЛЕЕ НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ ДЛЯ МОРСКИХ И СЕВЕРНЫХ ПРОЕКТОВ	Высокая							Низкая		Средняя	Низкая	
ИТОГО БАЛЛОВ:	60	35	40	35	35	35	65	65	75	40	90	

	10 баллов
	5 баллов
	0 баллов

Таблица 1.1 Плюсы и минусы различных технологий размещения буровых отходов и промышленных жидкостей

Оценивались следующие факторы: 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 северных широт нашей страны.

В результате сравнения было установлено, что только три технологии могут быть эффективно реализованы на практике при разработке морских месторождений:

Первая технология — это размещение на специальных полигонах на суше. Этот подход требует значительных логистических затрат, особенно на территории географических объектов со сложными климатическими условиями. Для размещения большого количества отходов необходимо строительство специализированной портовой инфраструктуры для их приема и хранения, и наличие большого флота кораблей для непрерывной транспортировки во время бурения и эксплуатации платформ, что делает метод дорогостоящим и трудоемким.

Вторая технология – это применение термических методов, таких как сжигание и пиролиз. Ее реализация возможна, и она осуществлена на некоторых проектах разработки морских месторождений углеводородов. Главным недостатком такой технологии, помимо высокой стоимости и потребления значительного количества энергии, является ее неполная экологическая безопасность, в связи с тем, что несгоревшие сухие остатки шлама, содержащие соли и минералы металлов (иногда тяжелых), выбрасываются в море, что наносит значительный вред флоре и фауне мирового океана.

Третья технология – это размещение отходов в подземных пластах (доменах) с геомеханическим и геофизическим контролем целостности флюидоупоров. Этот метод подразделяется на несколько подходов, отличающихся способом контроля целостности покрышки флюидоупора. В рамках диссертационного исследования разработан, протестирован и внедрен уникальный метод подтверждения целостности покрышки флюидоупора. Этот подход не требует бурения дополнительных наблюдательных скважин, обеспечивает высокую надежность контроля и является экономически наиболее обоснованным при разработке морских месторождений Российской Федерации.

На рисунке 1.1 проиллюстрированы результаты сравнения рассмотренных методов. Перечисленные выше три метода, применимые в условиях разработки морских месторождений, выделены белым цветом с зеленой окантовкой, остальные – серым с черной окантовкой. Третья технология представлена в двух вариантах: с контролем состояния пластов-доменов по наблюдательным скважинам (не подходит для морских проектов) и с контролем состояния пластов-флюидоупоров геофизическими и геомеханическими методами (подходить для морских проектов).

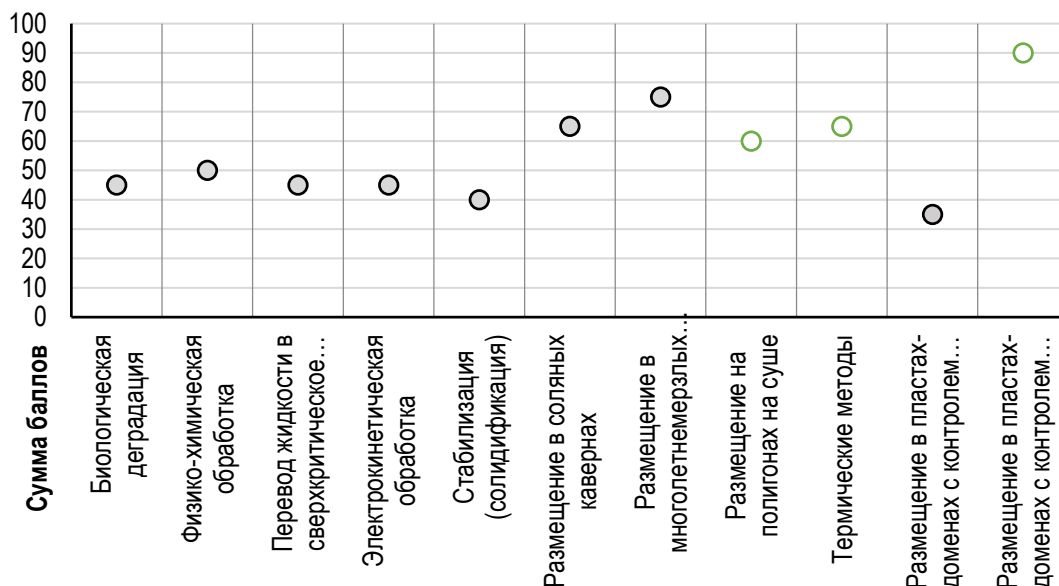


Рисунок 1.1. Пример внутрискважинного каротажа с выделением поглощающих пластов и флюидоупоров

Видно, что предлагаемая технология закачки отходов в пласты домены с привлечением дополнительных методов контроля состояния не только самих

доменов, но и пластов-флюидоупоров, является предпочтительной для условий морских месторождений, находящихся в северных широтах. Этот метод позволяет минимизировать экологические риски и снизить затраты, что подтверждается опытом проектов на Ближнем Востоке, где за шесть лет удалось сэкономить 4 миллиона долларов [Chauvin, 2018]. С 2008 года на проекте "Сахалин-2" успешно реализуется непрерывный цикл бурения и эксплуатации скважин без остановки производства. Вывоз шлама, учитывая плечо доставки от платформы до порта, составляет 7 суток. Но благодаря предложенной технологии закачки отходов бурения в глубокие горизонты недр компании не пришлось привлекать несколько десятков судов снабжения для обеспечения непрерывного вывоза выбуриваемого шлама. Это значительно снизило затраты на дорогую и сложную логистику и обеспечило эффективную и безопасную возможность утилизировать шлам. Закачка отходов в пласт также доказала свою эффективность на месторождениях Северного моря, Мексиканского залива, и других регионов [Guo et al., 2005; Svensen, Taugbol, 2011; Mahrous et al., 2019].

Однако успешная реализация закачки требует тщательного выбора скважин, контроля давления и скорости закачки, а также специального оборудования [Mahrous et al., 2019]. Важным аспектом является мониторинг целостности пластов-флюидоупоров, во избежание неконтролируемых выбросов [Marketz et al., 2021].

Таким образом, утилизация отходов бурения остается актуальной проблемой, особенно для морских месторождений. Закачка в недра является предпочтительным методом для удаленных и экологически чувствительных регионов, таких как остров Сахалин, где климатические и инфраструктурные ограничения делают другие методы неэффективными. Дальнейшее развитие технологий и нормативной базы позволит минимизировать экологические риски и повысить экономическую эффективность утилизации отходов бурения.

1.2 Заключение по главе 1

Размещение отходов бурения и технологических жидкостей в подземных пластах доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров является наиболее перспективным методом, получившим максимальный итоговый балл в результате сравнения технологий. Оно характеризуется минимальными экологическими рисками, низкой стоимостью и высокой надежностью.

Размещение на полигонах также может быть использовано, но его применение ограничено высокой стоимостью и логистической сложностью [Ling et al., 2017]. Применение термических методов связано с высокой стоимостью, высоким потреблением энергии и не исключает экологический вред ввиду остаточных выбросов сухих остатков шлама включающих соли и минералы.

Остальные методы либо имеют высокие риски загрязнения окружающей среды, либо требуют значительных ресурсов для реализации, либо не реализуемы при разработке морских проектов.

В результате проведенного анализа становится очевидным, что вопрос захоронения отходов является чрезвычайно актуальным, особенно в контексте освоения и разработки морских месторождений. В данном случае закачка в недра с контролем минимального горизонтального напряжения в пласте представляется наиболее предпочтительным методом, так как она позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и снизить операционные логистические расходы и повысить экономическую эффективность проектов [Ling et al., 2017]. Однако, несмотря на свои преимущества, реализация данного метода сопряжена с рядом объективных геологических рисков. В связи с этим, особое внимание необходимо уделить разработке эффективных методов предотвращения этих рисков, а также созданию надежных систем мониторинга, способных оперативно выявлять потенциальные угрозы. В рамках данной работы основное внимание сосредоточено на одном из ключевых рисков – прорыве флюидоупорной покрышки, который может привести к значительным экологическим и экономическим потерям. Рассматриваются методы предотвращения данного риска, а также предлагается необходимая система мониторинга, которая позволит

своевременно обнаруживать и устранять потенциальные угрозы, обеспечивая безопасность и устойчивость процесса размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр.

Таким образом, для разработки морских месторождений рекомендуется использовать технологии размещения отходов в подземных пластах с покрывающими непроницаемыми крышками флюидоупорами, особенно с применением современных методов контроля целостности данных флюидоупоров.

Изучение и сравнение различных технологий, представленное в данной главе, обосновывает защищаемое положение 1:

Размещение отходов бурения и технологических жидкостей в подземных пластах доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров является предпочтительной технологией утилизации отходов бурения при разработке месторождений в акватории острова Сахалин.

Глава 2. Технология размещения отходов

Технология утилизации (захоронения) бурового шлама и технологических жидкостей (Cuttings Re-Injection, CRI) путем закачки в глубокие горизонты недр представляет собой комплексный технологический процесс, распределенный во времени на весь срок эксплуатации месторождений. Данная технология предполагает закачку специально подготовленной шламовой пульпы, содержащей твердые отходы бурения, воду и загеливающие агенты в пласты-домены, предварительно отобранные в ходе комплексного геологического изучения на основе геофизических исследований. [Mkrago et al., 2015].

На сегодняшний день предложенная технология захоронения отходов бурения и технологических жидкостей признана наиболее эффективным и экологически безопасным методом утилизации отходов, полностью соответствующая международным стандартам и принципам «нулевого сброса». По сравнению с альтернативными методами переработки, она обеспечивает максимальный уровень экологической защиты при минимальном воздействии на окружающую среду.

2.1 Основные положения технологии размещения отходов в глубоких горизонтах недр

Освоение месторождений углеводородов всегда сопряжено с бурением разведочных и эксплуатационных скважин. При этом остро стоит вопрос о способах хранения и утилизации отходов бурения [Онофриенко, Крымов, 2021]. Существуют различные методы утилизации отходов на поверхности, включающие биологическую и термическую обработку, однако они характеризуются высокой стоимостью, сложностью реализации и занимают значительные площади под хранение [Gaurina-Medimurec et al., 2005; Mkrago et al., 2015]. В отличие от поверхностных методов, глубокое подземное захоронение отходов бурения менее

затратно и требовательно к ресурсам [Gaurina-Međimurec et al., 2020]. Тем не менее, безопасная реализация такого метода на практике требует комплексирования результатов геофизических исследований, мониторинга и моделирования процесса закачки [Guo et al., 2007].

Процесс закачки отходов бурения в целевой пласт технологически состоит из нескольких стадий [Mahrous et al., 2019]: сбор отходов бурения; их измельчение и замешивание с вязким флюидом для удовлетворения требованиям к закачиваемым в породу отходам; закачка смеси в целевой пласт с использованием насосов высокого давления. [Abou-Sayed et al., 2002; А.А. Олейников и др., 2023]: При проведении закачки реализуется инициация и развитие трещины, схожей с трещиной гидроразрыва [Wisén et al., 2019]. 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 или произойти повторное раскрытие уже сформированной трещины и/или инициация новой [Guo et al., 2007]. Необходимо учитывать, что единичная закачка отходов бурения в неповрежденный выбранный пласт может соответствовать модели классического гидроразрыва с единственной магистральной трещиной, однако повторная закачка отходов бурового шлама принципиально ведет к образованию сети разномасштабных трещин [Gulrajani, Nolte, 2000; Abou-Sayed et al., 2002; Guo et al., 2007]. Также важно выбирать целевой пласт в соответствии со способностью выше- и нижележащих пластов служить флюидоупором, чтобы избежать прорыва закачиваемой жидкости в зону вне пласта-домена.

Вне зависимости от реализуемого сценария разрушения одним из ключевых рисков остается прорастание новой или ранее сформированной трещины

в пласт-флюидоупор [Gaurina-Medimures et al., 2020]. Для эффективной закачки отходов бурения, с одной стороны, необходимы инициация и развитие трещины гидроразрыва с достижением максимального раскрытия и протяженности, однако, с другой стороны, требуется недопущение ее распространения в пласт-флюидоупор [Veil, Dussealt, 2003], [А.В. Береснев и др. 2023]. В то же время, в отличие от классической операции по гидроразрыву пласта, в случае закачки отходов бурения нет требований к насыщению целевого пласта углеводородами, поэтому достаточно выбирать целевой пласт так, чтобы выше него находился пласт-флюидоупор, в котором действовало бы минимальное главное напряжение, значительно превышающее это напряжение в целевом пласте [Wasantha et al., 2018]. Высокий контраст между минимальными напряжениями, действующими в целевом пласте и пласте-флюидоупоре, необходим для успешного проведения циклической закачки. Как было указано выше, напряжения в целевом пласте растут в результате закачки, что подтверждается фактическими наблюдениями [Guo et al., 2007], аналитическими [Ji et al., 2009] и численными [Shokanov et al., 2011] моделями, в связи с этим контраст напряжений снижается. Как следствие, пласт, успешно игравший роль флюидоупора на начальных циклах, может не оказаться флюидоупором впоследствии.

Важнейшим вопросом остается перераспределение давления насыщающего целевой пласт флюида и соответственное изменение минимального главного напряжения (эффективного), поскольку давление закачки должно превосходить минимальное главное напряжение в целевом пласте и не достигать минимального главного напряжения в пласте-флюидоупоре [Wasantha et al., 2018]. При этом остается возможность контролировать темпы изменения пластового давления: могут быть изменены параметры смеси отходов бурения с жидкостью до закачки [Mengying et al., 2023], темпы закачки на одном цикле [Nwonodi et al., 2023] и/или периодичность циклов закачки.

Как было показано в предыдущем разделе, эту технологию на сегодняшний день можно считать оптимальной среди имеющихся технологий утилизации

отходов бурения в условиях разработки морских месторождений острова Сахалин и соответствующей самым строгим глобальным требованиям нулевого сброса. Технология является экологически безопасным методом утилизации отходов по сравнению с другими современными методами. Для создания безопасного и экономически выгодного процесса обратной закачки важен весь производственный цикл от подготовки до реализации и проведения самого процесса.

2.2 Основные этапы проведения работ для реализации размещения отходов

Основные этапы проведения работ при реализации проектов по размещению отходов в глубоких горизонтах недр складываются из подготовки проекта к реализации, самой операционной стадии, когда непосредственно осуществляется закачка отходов бурения и технологических жидкостей с контролем рабочих параметров во время закачки и этапа мониторинга после остановки закачки с дальнейшим подтверждением целостности всей системы. Первый этап выполняется в самом начале реализации проекта, этапы два и три, циклически повторяются до окончания всего проекта. Реализация проекта может занимать годы и десятилетия, и все это время необходим контроль операционных параметров, мониторинг и подтверждение целостности системы.

Этапы реализации технологии закачки буровых и технологических отходов разбиваются на следующие подэтапы:

I Подготовка проекта к эксплуатации включает в себя:

- Предварительный выбора геологического домена (пласт-домен) и постановку цели бурения;
- Проектирование и расчет конструкции скважины с учетом особенностей скважины, выбора элементов заканчивания, подготовкой и выбором подземного и наземного оборудования;
- Непосредственно бурение скважины по заданной траектории к выбранной/установленной/определенной подземной цели;

- Проведение петрофизических и геомеханических исследований в открытом стволе поглощающих скважин и определение прочностных свойств пород в перспективном поглощающем пласте-домене и покрывающих его флюидоупоров;
- Заканчивание скважины;
- Установление рабочих и технических пределов системы «поверхностное оборудование – скважина – поглощающий горизонт – флюидоупоры»;
- Выбор наземного комплекса подготовки шлама и шламовой пульпы для последующей закачки в нагнетательную скважину.

В этапе по подготовке проекта рассмотрены только пункты, отвечающие теме диссертационной работы, а именно: предварительный выбор геологического домена, проведение петрофизических и геомеханических исследований, установление рабочих (операционных) и технических пределов системы поверхностное оборудование – скважина – поглощающий горизонт – флюидоупоры. Остальные пункты подготовительного этапа не входят в состав данной работы.

II Операционная стадия закачки включает в себя:

- Определение потенциальных операционных, геологических и экологических рисков и мер контроля;
- Подготовку шлама с измельчением до 400 мкм;
- Подготовку пульпы с приданием необходимых реологических свойств (плотность, вязкость) путём добавления загеливающих агентов и морской воды или технологических стоков для разбавления [Poclin et al., 2015];
- Закачку в пласт в режиме авто-ГРП;
- Контроль параметров во время закачки.

III Мониторинг и подтверждение целостности системы включает в себя:

- Утвержденный план мониторинга операционных процессов [Марченко и др., 2023];

- Промыслово-геофизический контроль за эксплуатацией скважин для утилизации бурового шлама;
- Визуализация процесса мониторинга поглощающих скважин в программном обеспечении;
- Контроль целостности покрышек флюидоупоров;
- Прогнозирование наполнения пластов-доменов.

В рамках данной работы остановимся на ключевых технологических моментах перечисленных этапов, оставляя за ее рамками набор действий юридического и административного характера, необходимых для успешной практической реализации технологии размещения отходов в глубоких горизонтах недр.

2.3 Подготовка проекта

Для выбора целевого пласта и дальнейшего подтверждения наполнения пласта-домена и целостности пласта-флюидоупора автором предложено проводить минимальный и оптимальный комплексы геофизических исследований. Все перечисленные методы геофизических исследований можно обобщить в таблице 2.1, где в оптимальный комплекс входят все исследования, включенные в минимальный комплекс, а также дополнительные методы, повышающие точность и надежность мониторинга.

	Минимальный комплекс	Оптимальный комплекс
Выбор целевого пласта-домена (ЦПД)	Сейсмические исследования Сейсмика 3D	Сейсмические исследования -
	ГИС Электрический каротаж Температурный каротаж Гамма-каротаж Нейтронный каротаж Плотностной каротаж	ГИС Кавернометрия Кросс-дипольный акустический каротаж Электрический и акустический микроимиджи
	Лабораторные исследования Электрические свойства ЦПД Транспортные свойства ЦПД. Механические свойства ЦПД.	Лабораторные исследования Механические свойства пород пластов-флюидоупоров
Контроль и мониторинг	Сейсмические исследования -	Сейсмические исследования Сейсмика 4D Вертикальное сейсмическое профилирование
	ГИС -	ГИС Контроль температуры Спектральная шумометрия
	Лабораторные исследования -	Лабораторные исследования Развитие трещины гидроразрыва в композитной среде, состоящей из ЦП и флюидоупором
	Скважинные испытания Контроль целостности Мониторинг давления закачки	Скважинные испытания Контроль целостности флюидоупоров Мониторинг давления закрытия трещины

Таблица 2.1. Предложенные минимальный и оптимальный комплексы геофизических исследований для выбора пласта-домена, подтверждения его наполнения и подтверждения целостности пласта-флюидоупора.

2.3.1 Выбор целевого пласта-домена (Минимальный комплекс)

Минимальный комплекс геофизических исследований должен быть направлен на решение нескольких ключевых задач. Во-первых, он должен обеспечить возможность выбора подходящего геологического пласта-домена для безопасного размещения отходов. Во-вторых, необходимо детально описать характеристики самого пласта, а также покрывающего его флюидоупора. Это позволит убедиться, что при закачке отходов бурения и технологических жидкостей в выбранный пласт-домен, процесс будет контролируемым и безопасным. Флюидоупор должен эффективно удерживать закачиваемые отходы, предотвращая их миграцию в вышележащие пласты или выход на поверхность — будь то морское дно или дневную поверхность суши. При этом риски утечек должны быть полностью исключены или сведены к минимально возможному уровню.

Использование минимального комплекса геофизических исследований позволяет не только определить оптимальный пласт-домен для размещения отходов, но и в будущем подтвердить, что выбранный пласт-флюидоупор способен надежно изолировать закачиваемые отходы в пределах целевой зоны. Такой подход снижает геологические риски, обеспечивает экологическую безопасность и минимизирует потенциальное воздействие на окружающую среду, что особенно важно при реализации проектов, связанных с утилизацией отходов. Таким образом, минимальный комплекс исследований является необходимым инструментом для обоснования выбора пласта-домена и подтверждения его пригодности для безопасного захоронения отходов. В минимальный комплекс геофизических исследований скважин для выбора пласта-домена предлагается включить: 3D сейсмические исследования, электрический, температурный, гамма, плотностной и нейтронный каротажи. Также рекомендуется выполнять лабораторные исследования на керне, позволяющие оценить электрические, фильтрационно-емкостные и геомеханические свойства целевого пласта.

3D-сейсмические исследования

3D-сейсмические исследования широко применяются в разведочном бурении и при создании проектов разработки месторождений углеводородов. Метод 3D-сейсмологии позволяет получать детальное трехмерное изображение подземных структур, что дает возможность картировать геологические структуры и их границы, выделять пласты с различными характеристиками, определять насыщение пластов и их физические свойства. Кроме того, с помощью 3D-сейсмологии можно выявлять различные нарушения в недрах, такие как разломы, зоны трещиноватости, а также зоны с аномально высоким давлением.

При выборе пласта для закачки отходов важно учитывать его емкость, проницаемость и наличие прочного покрывающего барьера - флюидоупора. Оптимальными являются пласты с толщиной от нескольких метров, которые перекрываются мощным флюидоупором, значительно превышающим толщину самого пласта. Это позволяет минимизировать риски утечек закачиваемых отходов за пределы целевой зоны. 3D-сейсмология на этапе предварительного анализа помогает определить потенциальные пласты для закачки, избегая зон нарушений и обеспечивая надежное захоронение отходов.

Таким образом, использование 3D-сейсмологии на ранних этапах планирования позволяет не только выбрать оптимальный пласт для закачки, но и значительно снизить или полностью исключить риски неконтролируемых утечек в вышележащие пласты, вплоть до поверхности морского дна или суши.

Электрический каротаж в открытом стволе

Электрический каротаж (УЭС) в открытом стволе является одним из основных методов геофизических исследований скважин. Суть метода заключается в измерении электрического поля горных пород. При перемещении зонда вдоль ствола скважины фиксируется изменение удельного электрического сопротивления пород в зависимости от глубины. Полученные данные подвергаются анализу.

Удельное электрическое сопротивление чувствительно к концентрации проводящих элементов в объёме породы, ключевым из которых является вода. Таким образом, с помощью метода УЭС можно определить объем воды в горной породе. Помимо воды, к проводящим электрический ток средам относятся некоторые минералы, входящие в состав пород (пирит, графит). В подавляющем большинстве случаев, эти компоненты объема имеют подчиненное значение и не оказывают существенного влияния на величину измеряемого удельного электрического сопротивления.

В полностью водонасыщенной породе объем воды (оцененный по методу удельного электрического сопротивления) соответствует величине общей пористости.

Удельная электропроводность также чувствительна к величине УЭС пластовой воды (зависит от ее эквивалентной минерализации и температуры), сложности геометрии токопроводящих каналов и характеристикам смачиваемости породы.

Температурный каротаж (термометрия)

Температурные исследования скважин после бурения (до эксплуатации) позволяют измерять (оценивать) начальный (базовый) температурный градиент (температурный профиль). При измерениях, как правило, используется высокочувствительный термометр, позволяющий с высокой точностью (до сотых долей градуса) измерять температуру в зависимости от глубины. Последующие изменения и расхождения с базовым температурным градиентом при исследованиях во время закачки (эксплуатации скважины) будут определять зоны закачек и подтверждать (не подтверждать) целостность флюидоупоров.

Гамма-каротаж

Исследования, основанные на измерении естественного гамма-излучения горных пород, являются одним из ключевых методов определения их литологического состава. Небольшой уровень естественной радиации, регистрируемый приборами, объясняется присутствием в геологических породах

незначительного количества радиоактивных элементов, таких как радий, торий или уран, продуктов их распада, а также некоторых изотопов (например, калия). Разные породы содержат разное количество радиоактивных элементов, ввиду присутствия различных минералов в своем составе. Например, глины и граниты характеризуются относительно высоким радиационным фоном, тогда как известняки, напротив, имеют очень низкий уровень радиации. Именно измерение радиационного фона позволяет определять литологический состав залегающих пород (например, выделять их глинистость).

Из-за относительно низкого уровня естественной радиоактивности пород, глубина исследования при гамма-каротаже не превышает 30 см. Однако этого достаточно для определения литологического состава пород, что делает метод эффективным и широко применяемым в геофизических исследованиях. Таким образом, гамма-каротаж является важным инструментом для анализа геологических структур и их характеристик.

При выборе пластов-доменов и покрывающих флюидоупоров определяются пласты с пониженной радиоактивностью, как правило песчаники или карбонаты и наличием более высокордиоактивных пород, как правило глин (глинистых алевролитов, аргиллитов).

Нейтронный каротаж

Одним из наиболее распространенных методов геофизических исследований скважин, позволяющих определять характеристики пород (пористость, флюидонасыщение), является нейтронный каротаж. В основе этого метода лежит воздействие на окружающие породы потоком нейтронов высокой энергии, которые излучаются источником скважинного прибора. При взаимодействии с породой поток нейтронов замедляется, то есть энергия уменьшается, рассеивается и поглощается. Приемник прибора фиксирует изменения в потоке излучения, и на основе характера этих изменений можно определить пористость и насыщение пород. Например, водород является наиболее эффективным замедлителем

нейтронного излучения, что позволяет рассчитывать пористость и различать водо-, нефте- и газонасыщенные породы.

При выборе пластов-доменов для размещения отходов насыщение пласта не играет ключевой роли, однако пористость имеет критическое значение. Она позволяет рассчитать приемную способность пласта-коллектора (домена) и оценить его потенциал для безопасного размещения отходов. Кроме того, с помощью данных о пористости подтверждаются свойства флюидоупора. В сочетании с гамма-каротажем, который помогает определить литологический состав пород, нейтронный каротаж обеспечивает комплексное изучение флюидоупора. Как правило, в качестве флюидоупора выступают глинистые породы, которые отличаются повышенной радиоактивностью, а также низкими значениями пористости и проницаемости, что делает их идеальным барьером для удержания закачиваемых жидких и твердых отходов.

Таким образом, нейтронный каротаж в сочетании с гамма-каротажем предоставляет надежные данные для выбора и подтверждения пригодности пластов-доменов и флюидоупоров, что является важным этапом в обеспечении экологической безопасности при размещении отходов.

Плотностной каротаж

Плотностной каротаж является ключевым методом для оценки пористости горных пород. Измерение плотности необходимо для оценки геомеханических характеристик. Оно осуществляется с помощью гамма-гамма метода (измерения плотности спада наведённой радиоактивности от источника гамма-квантов), в основе которого лежит принцип Комpton-эффекта. На основе плотностного каротажа в комплексе с другими методами ГИС и лабораторных исследований при выборе пластов-доменов под закачку рассчитывается и уточняется пористость горных пород и уточняются геомеханические свойства пород.

Лабораторные исследования керна

Исследование электрических свойств керна целевого пласта-домена позволяет измерить удельное электрическое сопротивление при различной степени

насыщения. По объему воды в породе можно определить пористость пласта. Используя полученные данные о пористости, косвенными (модельными) методами могут быть рассчитаны геомеханические характеристики пласта, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и другие. Пористость также служит основой для расчета проницаемости поглощающего пласта, а геомеханические свойства влияют на выбор интервала перфорации, что является важным этапом при проектировании закачки.

Измерение фильтрационно-емкостных свойств керна позволяет оценить продуктивность и проницаемость пласта. Эти параметры играют ключевую роль при выборе наиболее подходящих зон для размещения отходов бурения и технологических жидкостей. Высокая продуктивность и проницаемость обеспечивают эффективную диссипацию давления, что способствует увеличению срока эксплуатации пласта-домена.

Механические эксперименты на керне (а также измерение скоростей распространения продольной и поперечной акустических волн) дают возможность напрямую определить геомеханические характеристики пород. На основе этих данных рассчитываются модуль Юнга, коэффициент Пуассона и другие параметры, которые необходимы для оценки прочностных свойств пласта.

Комплексное применение перечисленных методов исследования керна позволяет определить, как механические, так и фильтрационно-емкостные свойства целевого пласта. Это дает возможность оценить поглощающую способность и прочностные характеристики пласта, рассчитать необходимые давления при закачке, спрогнозировать срок эксплуатации пласта-домена, выбрать оптимальный интервал перфорации для закачки, определить прочностные параметры скважины и уточнить коэффициенты, используемые при геофизических исследованиях скважин в открытом стволе. Таким образом, комплексный анализ керна обеспечивает надежную основу для проектирования и реализации безопасного и эффективного размещения отходов.

2.3.2 Выбор целевого пласта (Оптимальный комплекс)

В дополнение к минимальному комплексу предлагается использовать расширенный комплекс исследований, включающий работы, перечисленные далее.

Кавернометрия

Кавернометрия представляет собой комплекс исследований, направленных на измерение диаметра скважины в открытом стволе. Существует два основных типа каверномеров: механический и ультразвуковой. Механический каверномер, также известный как многорычажный каверномер, оснащен рычагами, которые прижимаются к стенкам скважины. При движении прибора рычаги фиксируют профиль внутреннего диаметра ствола, что позволяет получить детальное представление о его форме. Ультразвуковой каверномер, в свою очередь, представляет собой внутрискважинный прибор, оборудованный двумя электроакустическими преобразователями направленного действия. Эти преобразователи работают в режиме приема и передачи ультразвукового акустического сигнала. Они отправляют сигнал на стенку скважины и одновременно принимают отраженный сигнал. По времени возвращения сигнала определяется расстояние от прибора до стенки скважины. При спуске или подъеме прибора вдоль ствола происходит картирование его профиля.

Диаметр ствола скважины не всегда соответствует диаметру бурового долота из-за влияния различных геологических и технологических факторов. Например, глинистые пропластки и соли могут иметь увеличенный диаметр из-за вымывания. Осыпание стенки скважины по одному из направлений может указывать на частичную потерю устойчивости ствола (недостаточный удельный вес бурового раствора). С другой стороны, проницаемые породы, такие как песчаники, частично поглощают жидкость из бурового раствора, что приводит к образованию фильтрационной корки из кальматантов на стенках скважины. Это, в свою очередь, уменьшает диаметр скважины в зонах проницаемых пород.

Полученный профиль ствола скважины позволяет определить наличие проницаемых и непроницаемых пород. В сочетании с другими методами геофизических исследований скважин, кавернометрия обеспечивает точное выделение зон поглощающих пластов-доменов и покрывающих флюидоупоров. Это делает кавернометрию важным инструментом для комплексного анализа геологических условий и выбора оптимальных интервалов для закачки отходов бурения и технологических жидкостей.

Кросс-дипольный акустический каротаж

Исследования кросс-дипольного акустического каротажа, позволяют с помощью излучения акустических сигналов определить строение и структуру пластов, а также решить ряд важных задач. К таким задачам относятся определение типа и коэффициента пористости исследуемых пород, оценка проницаемости пластов, литологическое расчленение разреза, расчет динамических механических свойств пород, вычисление из модулей упругости и направлений анизотропии на основе данных кросс-дипольного зонда. Кроме того, метод позволяет прогнозировать направление естественных трещин и определять ориентацию вновь создаваемых гидравлических трещин.

Принцип исследования заключается в генерации высокочастотных звуковых акустических волн и измерении времени прохождения упругой волны через пласт. Волна разделяется на продольную и две поперечные составляющие, после чего рассчитывается отношение их скоростей.

Кросс-дипольный акустический каротаж является эффективным и информативным дополнением к минимальному комплексу исследований предложенных автором. Он позволяет идентифицировать проницаемые пласты-домены и слабопроницаемые пласты-флюидоупоры, оценивать естественную трещиноватость как в пластах-доменах, так и в пластах-флюидоупорах, а также рассчитывать геомеханические и петроупругие свойства пород. Важным преимуществом метода является возможность определения направлений развития трещин, что помогает оптимально располагать поглощающие скважины. Это

позволяет минимизировать риск роста системы трещин в направлении соседних скважин или разломов при закачке.

Таким образом, кросс-дипольный акустический каротаж играет важную роль в оптимальном комплексе исследований, предложенном автором для выбора поглощающих пластов-доменов и покрывающих пластов-флюидоупоров. Его применение обеспечивает повышение точности и надежности при проектировании и реализации технологических процессов, связанных с закачкой и хранением отходов.

Электрические и акустические микроимиджеры

Электрические и акустические (ультразвуковые) микроимиджеры позволяют проводить детальные исследования пластов с высоким вертикальным и азимутальным разрешением, что делает их незаменимыми инструментами для анализа геологических структур. Электрический микроимиджер работает на принципах, аналогичных электрическому каротажу, но благодаря многорычажной конструкции, рычаги которой плотно прижимаются к стенкам скважины, он обеспечивает более детальную картину электрических свойств пород. Акустические сканеры пластов, в свою очередь, предоставляют высококачественные изображения ствола скважины даже в таких сложных условиях, таких как при наличии высокопористых и рыхлых пластов.

Совместное использование данных электрического и акустического микроимиджеров позволяет детально визуализировать состояние ствола скважины и окружающих пород. Такие исследования дают возможность выявлять естественные трещины, анализировать тонкослоистую структуру пласта, определять углы простираия и падения пластов, оценивать изменения пористости, включая вторичную пористость, связанную, например, с микротрещинами. Кроме того, микроимиджеры помогают отслеживать состояние стенок скважины, выявлять вывалы, каверны и определять литологические характеристики исследуемых пород с азимутальной привязкой.

Помимо определения оптимального направления бурения скважины, данные микроимиджеров играют важную роль в характеристике пластов-доменов для размещения отходов бурения и технологических жидкостей, а также пластов-флюидоупоров. Одним из ключевых преимуществ метода является возможность выявления систем микротрещин во флюидоупоре, которые не могут быть обнаружены другими методами. Подтверждение отсутствия вторичных трещин в флюидоупоре обеспечивает надежное размещение отходов, минимизируя риск утечки закачиваемых жидкостей в вышележащие пласты или на поверхность.

Таким образом, использование электрических и акустических микроимиджеров в комплексе с другими методами исследований позволяет не только повысить точность анализа геологических условий, но и обеспечить безопасное и эффективное размещение отходов, что делает их важным элементом оптимального комплекса исследований.

Лабораторные исследования керна

Совместно с исследованиями целевого пласта крайне желательно проводить исследования по определению механических свойств пластов-флюидоупоров. Исследования механических свойств керна позволяют определить геомеханические свойства флюидоупоров, рассчитать модули Юнга, коэффициенты Пуассона, минимальные и максимальные главные (горизонтальные) напряжения и установить операционный и технический пределы для работы специальных поглощающих скважин.

До начала закачки буровых и технологических отходов требуется определить прочностные свойства флюидоупоров на основе петрофизических и геомеханических исследований и данных.

Во время бурения скважины обычно проводится отбор керна в пласте, планируемом под закачку и в покрывающих флюидоупорах. КERN в дальнейшем используется для определения прочностных свойств пород и построения геомеханической модели геологического разреза.

В качестве флюидоупоров выбираются непроницаемые или слабопроницаемые породы с повышенными прочностными свойствами. Часто флюидоупором выступает глина, твердые суглинки, соли, гранит и другие породы, отличающиеся высокими прочностными характеристиками и низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) по сравнению с нижезалегающими проницаемыми породами (песчаники, карбонаты и др.), используемыми под захоронение отходов бурения и технологических жидкостей.

Наиболее важными параметрами для определения подходящего места закачки являются проницаемость, пористость, толщина целевого пласта, глубина залегания и структурно-геологические характеристики района [Gaurina-Medimures et al., 2020]. Как пример представлены параметры для предварительного выбора пласта-домена и покрывающих флюидоупоров. Параметры предлагаются в работе [Nadeem, Dusseault, 2007] значения:

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 целевого пласта: между 200 и 3000 м. [А.В. Сержанин и др. 2022].

Наличие переслаиваний песка и сланца (несколько слоев).

Не менее важным параметром при выборе подходящих геологических формаций для закачки отходов является механизм сдерживания трещин, который гарантирует, что образующиеся при закачке трещины не выйдут за границы закачиваемого пласта. Согласно [Guo et al., 2007], существует три основных механизма (барьера) локализации трещин: 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). Идеальным барьером напряжений является соляной пласт, поскольку градиент давления разрыва в нем выше по сравнению с

нагнетаемым пластом, а идеальный барьер модуля упругости обеспечивается существующим известняковым пластом. Все вышеупомянутые формации, такие как соль, известняк или высокопроницаемые формации, несложно распознать в литологическом профиле, особенно в хорошо известных районах с большим количеством геологических данных.

Во время закачки отходов может возникнуть аномально высокое поровое давление. Поэтому важно, чтобы наведенное давление на небольшом расстоянии от зоны закачки быстро снижалось до нормального уровня после каждого интервала закачки. Проницаемость является наиболее важным фактором, влияющим на быстрое снижение давления, и, если ее значение превышает 10 Д, то происходит быстрая утечка, и такая скважина не является хорошим кандидатом для захоронения отходов [Nadeem, Dusseault, 2007]. Низкая пористость всегда подразумевает меньшую емкость для захоронения отходов и большую сложность в сжатии массива горных пород для достижения требуемой емкости, что значительно усложняет достижение долгосрочной стабильности объекта захоронения отходов. Закачка отходов в глубокие пласты требует минимальной вертикальной миграции за пределы зоны захоронения, поэтому очень важно наличие низкопроницаемой породы-покрышки, например, сланца. Это особенно важно в тех случаях, когда в качестве целевой зоны выбран песчаник.

Комплекс исследований для определения флюидоупоров включает в себя геофизические исследования скважин, исследования на керне, диагностические закачки по определению давлений инициации и развития трещины, построение геомеханической модели геологического разреза и других исследований. В качестве примера, петрофизические свойства могут включать проницаемость, пористость, водонасыщение, газо- или нефтенасыщение, результаты ядерно-магнитного каротажа, гамма-каротаж и др. Геомеханические свойства могут включать динамические и статические модули Юнга, коэффициент Пуассона, минимальное и максимальные горизонтальные напряжения по разрезу, горное напряжение и др.

Таким образом, для каждого пласта может быть определен предел прочности самого пласта и покрывающего флюидоупора.

Перед началом закачки буровых и технологических отходов через нагнетательные скважины в пласт, требуется установить рабочие и технические пределы для всей системы поверхностное оборудование – скважина – подземные флюидоупоры.

Для поверхностного оборудования и элементов конструкции скважины устанавливаются пределы прочностным характеристикам материалов. Подбор оборудования в свою очередь проводится на основании максимальных прогнозируемых давлений закачек, учитывающих в том числе и прогнозные прочностные свойства утилизационного пласта и покрывающего его флюидоупора. В случае если поверхностное оборудование и конструкция скважины подобраны неправильно, то существует риск невозможности или ограничения в использовании для нагнетания в пласт в режиме авто-ГРП [Gogan et al., 2010]. В отличие от параметров используемого технического оборудования, прочностные характеристики пласта, в который производится размещение отходов, и пласта-флюидоупора невозможно изменять, так как они обусловлены геологическими условиями залегания.

Как правило слабым звеном в связке «поверхностное оборудование – скважина – флюидоупор», является именно флюидоупор, это требует детального изучения прочностных свойств покрышек флюидоупоров и установления рабочих и технических пределов таким образом, чтобы не было их прорывов и не было возможности неконтролируемого выхода пульпы за пределы лицензионного пласта или в худшем сценарии до поверхности морского дна. На основе вышеописанных методов с применением ГИС и построения геомеханической модели определяются критические значения прочности покрышки и устанавливаются рабочие и технические пределы для всей системы: «поверхностное оборудование – скважина – флюидоупор».

На рисунке 2.1 представлена схема напряжений в пластах и в трещине авто-ГРП. Из представленной иллюстрации понятно, что в момент закачки пульпы, давление в трещине превышает напряжение в пласте под утилизацию отходов, но не превышает напряжение в покрышке.

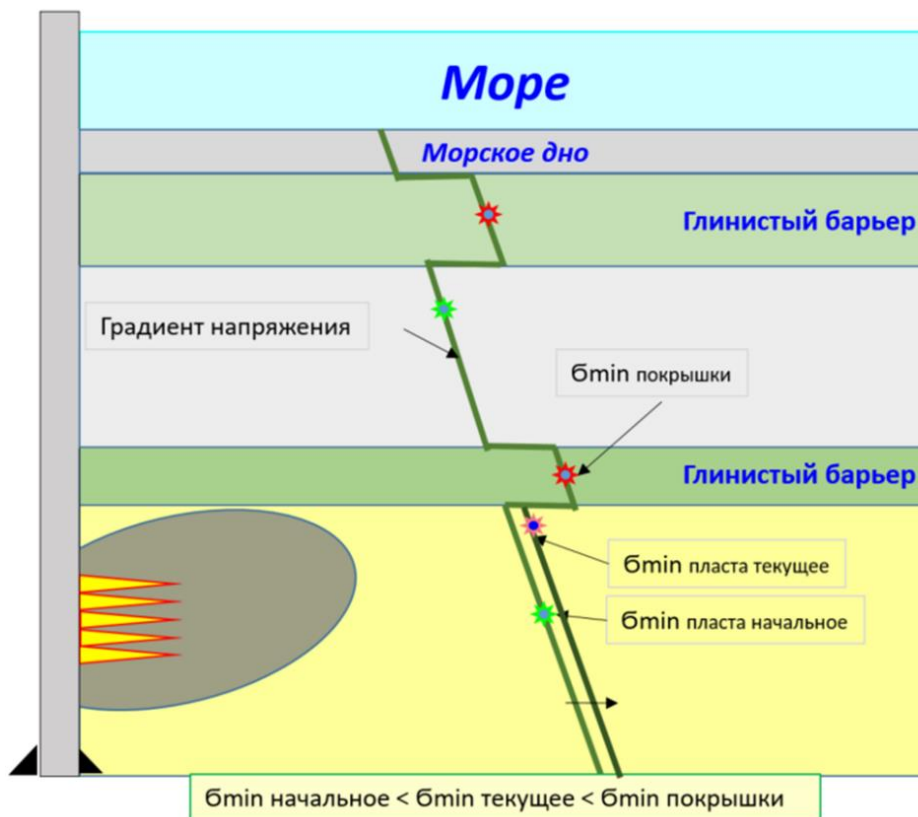


Рисунок 2.1. Схема напряжений в пластах и в трещине авто-ГРП

2.4 Операционная стадия закачки

2.4.1 Определение потенциальных рисков и мер контроля

Эксплуатация скважин для утилизации отходов бурения и технологических жидкостей связана с двумя основными категориями рисков: технологическими и геологическими.

К технологическим рискам относятся износ внутрискважинного оборудования (обсадных колонн, хвостовиков, насосно-компрессорных труб и др.) вследствие абразивного и химического воздействия агрессивных компонентов

закачиваемого агента, высоких давлений и контрастных температур. Это может привести к частичному или полному выходу скважины из строя, что негативно скажется на программе эксплуатационного бурения и экономических показателях разработки месторождения [Saasen et al., 2001].

К геологическим рискам относятся межпластовые перетоки, нарушение целостности горной породы-покрышки и закачка в нецелевые интервалы, вплоть до дневной поверхности или поверхности морского дна на морских месторождениях. Эти риски связаны с условиями эксплуатации скважины (часто в режиме гидроразрыва пласта), геомеханическими характеристиками разреза, прочностными свойствами материалов (цементный камень, металл колонн и обсадных труб), а также давлениями и объемами закачки. Помимо ухудшения эксплуатационных характеристик, геологические риски могут повлиять на выполнение лицензионных и экологических обязательств, создавая репутационные, политические и санкционные риски [Saasen et al., 2001].

Для минимизации и контроля указанных рисков применяются различные методы промыслово-геофизического контроля. Так, акустические и ультразвуковые методы используются для оценки технического состояния цементного камня и обсадных колонн. Ультразвуковая дефектоскопия позволяет идентифицировать элементы точечной коррозии и эрозии благодаря азимутальному покрытию. Электромагнитные методы (магнитно-импульсная дефектоскопия) применяются для контроля объемной потери металла обсадных колонн, хвостовиков и насосно-компрессорных труб, эти методы способны работать в нескольких барьерах, характеризуя каждый из них в отдельности. Многорычажные профилемеры используются для механического контроля состояния внутренней поверхности насосно-компрессорных труб и эксплуатационных колонн. Методы оценки профиля приемистости и движения флюидов, включающие высокоточную термометрию, спектральную шумометрию и механическую расходомерию, позволяют контролировать профили приемистости, внутриколонные и заколонные перетоки, а также положения

трещины гидроразрыва. Скважинная видеокамера применяется для визуального контроля внутрискважинных дефектов.

2.4.2 Подготовка шлама, пульпы и закачка в пласт

Закачка готовой пульпы, содержащей твердые отходы и жидкую фазу происходит в режиме авто-ГРП, с раскрытием трещины в пласте и в дальнейшем с созданием сложной системы трещин. Приемистость поглощающей скважины поддерживается за счет достаточных переносящих свойств раствора. Перенос твердых частиц может быть улучшен путем добавки в раствор бентонита или полимера для увеличения вязкости, а также за счет выполнения мероприятий по специальной подготовке (измельчению) шлама. Приемистость скважины поддерживается частой промывкой зоны перфорации и призабойной зоны закачкой чистого солевого раствора или морской воды.

Закачка пульпы бурового шлама производится порционно: сначала закачивается объем пульпы, не превышающий 250 м³, затем закачка в скважину останавливается для подготовки следующей порции смеси. Продолжительность такой остановки не превышает трех часов, что позволяет избежать оседания шлама на внутренних стенках НКТ, для этого подбирается специальная жидкость, способная удерживать твердые частицы во взвешенном состоянии достаточно продолжительное время. В случае, если отходов бурения больше нет, в скважину закачивается продавочная порция в количестве, равном сумме 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 и дальнейшая релаксация пласта (диссипация давления).

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.

Сохранность цельности ствола и обсадной колонны обеспечивается путем контроля за давлением в затрубном и межтрубных пространствах поглощающей скважины.

Важными элементами успешного применения технологии закачки (размещения) отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр являются:

- периодическое нагнетание порций пульпы (от 8 до 1000 м³), содержащей твердую фазу, чередуя в конце цикла закачки продавкой в пласт морской воды для очистки ствола скважины и призабойной зоны пласта [Poclin et al., 2015];
- соблюдение интервалов остановки для полного закрытия трещины и снижения давления вокруг скважины, чтобы своевременно отслеживать текущее напряжение в пласте и целостность флюидоупора;
- обязательное применение и соблюдение утвержденных графиков и процедур для закачек различных жидкостей.
- обеспечение высоких несущих способностей загеливающего агента, применяемого при подготовке пульпы в течение всего времени закачки, от устья скважины до попадания непосредственно в пласт, во избежание осаждения твердой фазы в стволе скважины во время закачек пульпы в больших объемах которые занимают несколько часов с периодическими остановками для приготовления очередной порции [Poclin et al., 2015];
- обеспечение налаженного автоматизированного контроля давлений в скважине и в поглощающем пласте-домене для мониторинга наполнения горного отвода и подтверждения целостности флюидоупоров;
- обязательное применение системы прогнозирования наполнения пластов-доменов

Для контроля процесса закачки отходов бурения используется следующее оборудование:

- датчики для замера устьевого/затрубного/межколонного давлений. Цифровой датчик-преобразователь давления позволяет считывать давления с ежесекундной периодичностью и преобразовывать значения в цифровой выходной сигнал. Данные датчики рассчитаны на максимальное давление возможное при закачке, с запасом. Перед пуском в эксплуатацию все датчики проходят необходимую сертификацию и калибровку.
- расходомер и датчик давления на нагнетательном насосе высокого давления. Плунжерные насосы высокого давления являются частью оборудования, а именно модуля для обратной закачки бурового шлама. На них помимо датчика давления установлен расходомер, который позволяет измерять текущий расход закачиваемой жидкости. Ежедневно оператор по закачке вносит данные в дневную сводку о скорости закачки, достигнутой во время размещения отходов бурения в поглощающую скважину.
- прибор для измерения плотности закачиваемых жидкостей. Для определения плотности образца бурового раствора и других жидкостей используются металлические рычажные весы для определения плотности раствора под давлением в футляре. Испытуемый образец помещается в емкость под давлением, что приближает условия к внутрискважинным.

2.5 Мониторинг и подтверждение целостности системы

Для мониторинга и подтверждения целостности всей системы поверхностное оборудование – скважина – поглощающий пласт-домен – пласт-флюидоупор составляется план мониторинга, который включает промышленно-геофизический контроль эксплуатации специальных поглощающих скважин, визуализацию процесса мониторинга в специальном программном обеспечении, контроль целостности покрышек флюидоупоров и прогнозирование наполнения пластов-доменов.

При долгосрочном процессе закачки твердых и жидких отходов напряжение в пласте в районе системы трещин постепенно возрастает и приближается к напряжению в покрывающем флюидоупоре – типичное поведение давления схематично показано на рисунке 2.2. Если напряжения в системе трещин не контролировать, то рано или поздно произойдет превышение допустимого значения напряжения и, соответственно, прорыв флюидоупора. Для предотвращения таких ситуаций устанавливают технические и операционные пределы.

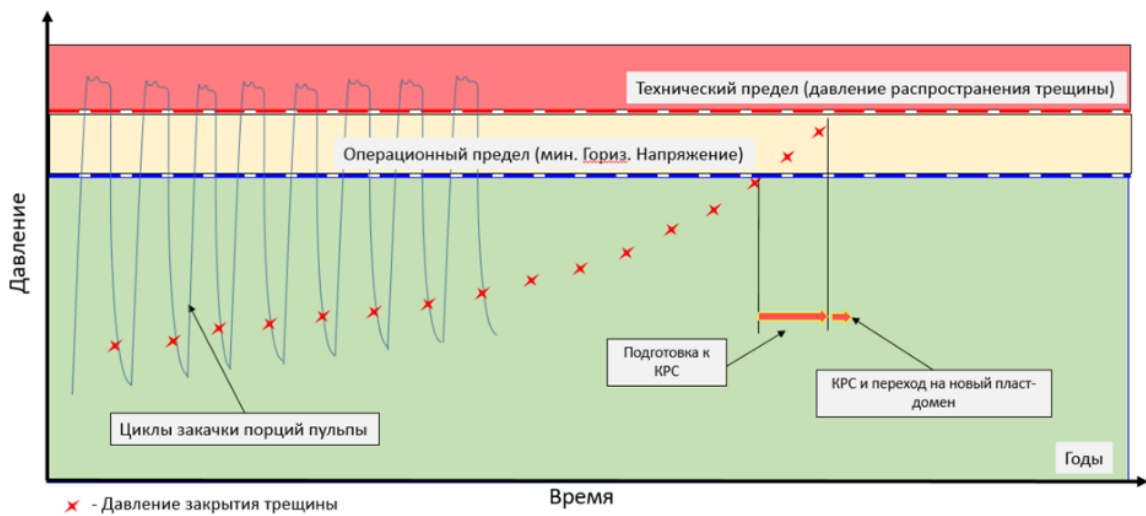


Рисунок 2.2 Схема наполнения пласта домена во времени и установленные пределы

2.5.1 Промыслово-геофизический контроль за эксплуатацией специальных поглощающих скважин

Как видно из предыдущего раздела, все этапы реализации описываемой технологии подразумевают достаточно детальное изучение состояния геологической среды и его изменения со временем. Для выбора целевых пластов для закачки и контроля состояния этих пластов и пластов-флюидоупоров во время закачки необходимо реализовать комплексную систему геофизических исследований среды на разных масштабах [Mehtar et al., 2016].

В работе [Baker, Rieke, 2001] предложена система разномасштабных геофизических исследований, которая позволяет получить необходимую

информацию для выбора подходящего пласта в качестве кандидата для закачки отходов бурения. Эти предложения, дополненные современными технологиями, разработанными за последние десятилетия [Gaurina-Medimurec et al., 2020], легли в основу описания минимального и оптимального комплексов геофизических исследований. Эти комплексы используются для выбора и последующего контроля состояния целевых пластов и пластов-флюидоупоров.

Геофизические исследования скважин (ГИС)

Отдельно рассмотрим стандартный и расширенный комплексы исследований.

Для успешного выбора целевого пласта для размещения отходов бурения необходимо тщательно определить его ключевые параметры. В научных работах [Baker, Rieke, 2001; Gaurina-Medimurec et al., 2020] предлагается ограничиваться использованием таких методов, как электрический и температурный каротаж, профиль гамма-излучения и нейтронный каротаж, для выбора подходящего целевого пласта для закачки. Однако для более точного определения безопасного режима закачки и минимизации рисков рекомендуется использовать элементы расширенного комплекса геофизических исследований скважин.

Как уже упоминалось ранее, одним из наиболее значительных рисков при закачке отходов бурения в пласт является возможность прорыва трещины через пласты-флюидоупоры. Для оценки этого риска применяются различные методы математического моделирования развития трещин. Эти методы могут быть основаны либо на стандартных моделях механики хрупкого разрушения [Deloge, Bouteca, 2001; Shioya et al., 2002], либо на численном моделировании разрушения микронеоднородной среды с накапливающейся поврежденностью [Zhang et al., 2022; Nwonodi et al., 2024]. В качестве исходных данных для таких моделей используется информация о механических свойствах пород околоскважинной зоны, которая может быть получена в результате совместной интерпретации данных, собранных при обработке расширенного комплекса геофизических

исследований скважин. Этот комплекс включает, в частности, кросс-дипольный акустический каротаж, который позволяет более точно оценить свойства пород [Moiseenkov et al., 2021, Al-Yaarubi et al., 2022].

Кроме того, для достоверной оценки рисков преодоления трещиной или трещинами барьера напряжений между целевым пластом и пластом-флюидоупором крайне необходимо знать значения и направления главных напряжений, действующих в этих пластах. Важным инструментом для построения одномерной геомеханической модели, содержащей такие данные, является кавернометрия. Этот метод позволяет определять положения и пространственные ориентации вывалов, образовавшихся в процессе бурения. На основе интерпретации этих данных можно провести оценку направлений и значений главных напряжений в тех пластах, где наблюдалось вывалообразование.

Дополнительное использование результатов акустического и электрического микроимиджеров позволяет уточнить значения напряжений, в том числе в тех интервалах, где вывалообразование не было зафиксировано [Dubinya, 2019]. Таким образом, комплекс стандартных геофизических исследований скважин можно считать минимально необходимым для выбора целевого пласта, в то время как расширенный комплекс геофизических исследований следует отнести к оптимальному набору методов, обеспечивающему более точную и надежную оценку параметров пласта и минимизацию рисков, связанных с закачкой отходов бурения.

Использование расширенного комплекса исследований не только повышает точность определения механических свойств пород, но и позволяет более детально оценить геомеханическую обстановку в околоскважинной зоне, что является критически важным для обеспечения безопасной и эффективной закачки отходов. Таким образом, применение современных методов геофизических исследований и математического моделирования становится неотъемлемой частью процесса выбора и оценки целевых пластов для размещения отходов.

Сейсмические исследования

Включают 3D-сейсмику, 4D-сейсмику, межскважинное просвечивание и вертикальное сейсмическое профилирование.

Согласно экономическому обоснованию, представленному в работе [Baker, Rieke, 2001], проведение 3D сейсмической съемки на начальных этапах проекта является наиболее предпочтительным решением, учитывая ее долгосрочные преимущества. Этот метод формирует фундаментальную основу, на которой базируются все последующие интерпретации и решения. В дальнейшем 4D-сейсморазведка может быть использована для отслеживания долгосрочных изменений в гидродинамике, петрофизических свойствах и распределении давления, вызванных крупномасштабной закачкой и гидроразрывом пласта. В качестве первоначального метода 3D-сейсмика позволяет выявить ключевые неоднородности в пласте, что является важным для понимания его структуры. Четырехмерная сейсморазведка, в свою очередь, продемонстрировала свою эффективность в обнаружении аномальных давлений и зон с повышенным содержанием газа, что делает ее ценным инструментом для мониторинга и контроля состояния пласта.

Пассивные сейсмические методы, включая микросейсмику, доказали свою эффективность в оценке роста трещин в вышележащих сланцевых пластах при закачке флюидов в песчаные зоны на глубинах до 1400 метров. Для успешной реализации этих методов рекомендуется использовать сеть наблюдательных скважин, расположенных на расстоянии до 300 метров друг от друга (в зависимости от петрофизических свойств пласта), оснащенных геофонами. Такая конфигурация позволяет регистрировать и интерпретировать сейсмические события, вызванные гидроразрывом в переслаивающихся песчано-сланцевых толщах и в интервалах закачки. Для повышения точности интерпретации рекомендуется применять вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в наблюдательных скважинах. Хотя ВСП является околоскважинным методом, он эффективен для определения роста высоты трещин, корреляции временных и глубинных данных, сопоставления

отражателей с вертикальными границами, настройки формы волны и контроля сейсмической скорости.

Документированные данные свидетельствуют о том, что закачка отходов бурения в недра может вызывать увеличение наведенной микросейсмичности. В работе [Shen et al., 2015] представлены результаты численного моделирования, демонстрирующие, что закачка отходов в высокопроницаемые пласты приводит к значительным изменениям порового давления и росту эффективного напряжения на разломах, что может спровоцировать их активацию. В ранних исследованиях, посвященных механическим процессам, сопровождающим обратную закачку отходов, представлены попытки моделировать развитие магистральной трещины гидроразрыва с использованием классических подходов [Deloge, Bouteca, 2001; Shioya et al., 2002]. Эти работы выявили, что одним из ключевых рисков является возможность прорыва трещины в выше- и нижележащие пласты-флюидоупоры. Было установлено, что такие риски зависят от напряженно-деформированного состояния пластов, и предложено использовать профиль минимального горизонтального напряжения для оценки вероятности прорыва трещины. Однако дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования [Zhang et al., 2022] показали, что классические модели магистральных трещин не подходят для описания процессов, связанных с закачкой отходов. Было доказано, что повторная закачка в тот же пласт может привести не к расширению существующей трещины, а к образованию новой, что указывает на формирование сложной системы трещин.

В работе [Nwonodi et al., 2024] проведен теоретический анализ изменения плотности трещин в околоскважинной зоне. Авторы показали, что подходы теории эффективных сред могут быть использованы для математического описания призабойной зоны как среды с высокой трещиноватостью. Для моделирования механического поведения такой среды предлагается применять методы петроупругого моделирования [Баяк и др., 2019], что требует комплексного использования разномасштабных геофизических данных. Таким образом, все перечисленные сейсмические методы можно отнести к оптимальному комплексу

геофизических исследований, необходимых для контроля и мониторинга состояния целевого пласта и пластов-флюидоупоров.

В специальных поглощающих скважинах процесс закачки отходов бурения и технологических жидкостей осуществляется в режиме авто-ГРП. В таком случае 4D-сейсмический мониторинг может быть эффективен при определении границ зон сети трещин, образующихся в пристволевой зоне скважин после закачки отходов бурения и технологических жидкостей в поглощающие пласты-домены. В процессе эксплуатации при закачке пульпа бурового шлама чередуется с закачкой воды, что и приводит к созданию сложной сети трещин, параметры которой, включая конфигурацию и размеры, трудно детально предсказать.

Определение границ зоны распространения трещин в подземных условиях представляет собой важнейший этап мониторинга, применимый при оценке рисков возникновения процессов, которые могут повлиять на прорыв флюидоупорных покрышек с возможным проникновением шламовой пульпы, содержащей шлам и химические реагенты в вышележащие пласты, располагающиеся вне лицензионных участков под закачку или, в крайнем случае, вплоть до морского дна или дневной поверхности. Понимание физических процессов, происходящих в сети трещин, помогает снизить риски при подготовке к бурению окружающих скважин, проходящих через пласты, в которые проводилась закачка. Прогнозы порового давления в таких пластах могут быть уточнены с учетом понимания процессов, протекающих в закачиваемой зоне. Как правило в пластах, в которые происходила закачка, даже на значительном удалении от зон закачки наблюдается повышенное поровое давление.

В исследованиях [Литвякова и др., 2017] были разработаны методы создания анизотропных моделей скорости залегания в глубине земной коры. Эти методы включают в себя техники "миграции по общему углу отражения" и "разложения сейсмических волн на два отдельных объема данных" – так называемые кубы зеркальной и рассеянной составляющих. В работе [Федяев, 2021] представлены инновационные решения: "метод локализации границ трещиноватости с помощью

топологического анализа рассеянного поля" и "алгоритм выделения отраженной и рассеянной частей данных трехмерной сейсморазведочной системы на прямых сейсмограммах в глубоких слоях после миграции".

Однако вышеперечисленные подходы имеют свои ограничения в плане получения полной информации и не позволяют с высокой точностью оценить размеры сети трещин, поскольку их оценка базируется, в основном, на изменениях флюидодинамики и давления во времени. Одним из ключевых достоинств 4D-сейсморазведки является возможность отслеживания изменений характеристик горных пород, вызванных эксплуатацией месторождения. Определение границ распространения и размеров системы техногенных трещин включает следующие ключевые шаги [Королев и др., 2022]:

- Определение зоны исследования вокруг перфорационного интервала скважины.
- Проведение временной обработки данных 4D по базовой и контрольной съемкам в выбранной области.
- Выполнение миграции по общему углу отражения с построением сейсмограмм на основе созданной глубинно-скоростной модели для базовой и контрольной съемок.
- Расчет разности сейсмограмм между базовой и контрольной съемками.
- Выделение рассеянной компоненты из сейсмограмм разности, содержащих зеркальную составляющую.
- Формирование 4D объема волнового поля рассеянной компоненты. · Расчет дополнительных характеристик, таких как интенсивность, фазовый сдвиг и энергия, на основе сформированного 4D объема волнового поля рассеянной компоненты.
- Определение границ зоны трещиноватости в трехмерном пространстве путем анализа предельных значений сейсмических атрибутов и рассеянной компоненты.

В данном подходе динамика и структура развития системы трещин описываются более детально и качественно. Это особенно важно для контроля и подтверждения целостности водоупорных слоев. [Королев и др., 2022].

Важно отметить, что успешное применение сейсмических методов требует не только технической оснащенности, но и глубокого понимания геологических и петрофизических особенностей изучаемого объекта. Например, интерпретация данных 4D-сейсморазведки должна учитывать изменения в насыщенности пласта флюидами, что требует интеграции данных о пористости, проницаемости и других параметрах. Кроме того, для повышения точности прогнозов рекомендуется использовать комбинированные подходы, включающие как сейсмические, так и другие геофизические методы, такие как гравиметрия и магниторазведка.

В целом, предложенная система разномасштабных геофизических исследований, включающая как минимальные, так и оптимальные комплексы методов, позволяет не только выбрать подходящий пласт для размещения отходов, но и обеспечить эффективный контроль за его состоянием в процессе эксплуатации. Это делает ее незаменимым инструментом для решения задач, связанных с утилизацией отходов бурения и минимизацией экологических рисков.

Лабораторные исследования керна

Отдельно рассмотрим исследования электрических и фильтрационно-ёмкостных свойств пород, и их механических свойств.

В работе [Gaurina-Medimurec et al., 2020] предложено проводить специальные испытания образцов, отобранных из целевого интервала, включая определение их электрического сопротивления, оценку проницаемости и пористости как по газу, так и по жидкости. Для более точного анализа процессов, происходящих при закачке отходов бурения, рекомендуется также проводить исследования по относительной фазовой проницаемости образцов, отобранных из целевого пласта. В таких исследованиях один из флюидов должен представлять собой пластовый флюид, а другой – суспензию, имитирующую отходы бурения, которые

планируется закачивать в пласт. Данный подход позволяет более достоверно анализировать гидродинамические процессы, возникающие при закачке, и моделировать перераспределение пластового давления, что является критически важным для обеспечения безопасной эксплуатации пласта.

Вопрос изучения механических свойств пород, однако, остается недостаточно освещенным в литературе, посвященной размещению отходов бурения в пластах-доменах. В ряде случаев авторы ограничиваются стандартным комплексом механических исследований [Baker, Rieke, 2001; Gaurina-Medimurec et al., 2020], которые используются для геомеханического моделирования. Этот комплекс включает одно- или многостадийное испытание образцов в условиях псевдотрехосного сжатия, построение паспорта прочности, определение предела прочности на одноосное сжатие, а также оценку сжимаемости среды и пустотного пространства. Однако особенности разрушения пород околоскважинной зоны при закачке отходов бурения требуют внесения определенных изменений в стандартный цикл испытаний.

Прежде всего, рекомендуется уделить особое внимание не только образцам, отобраным из целевого пласта, но и из пластов-флюидоупоров. Прочностные свойства этих пород оказываются даже более важными, чем свойства целевого пласта, для оценки рисков прорыва трещины при закачке в пласты-домены. Стандартные испытания на определение прочности на одноосное сжатие недостаточны для корректного описания условий, при которых может произойти прорыв. Зона, где трещина приближается к границе раздела между целевым пластом и пластом-флюидоупором, характеризуется сложной геометрией и неоднородным напряженно-деформированным состоянием [Zhang et al., 2022]. В таких условиях рост магистральной трещины в пласт-флюидоупор не может быть описан классическими моделями, которые основываются только на пределе прочности на одноосное сжатие и растяжение [Deloge, Bouteca, 2001; Shioya et al., 2002]. Прорыв трещины сопровождается развитием зон сдвиговых трещин и трещин растяжения в пласте-флюидоупоре. Для корректного описания этого

процесса необходимо использовать паспорт прочности в нелинеаризованном виде, представленный в виде поверхности текучести, зависящей от значений трех главных напряжений. Такая поверхность может быть получена в результате серии экспериментов по истинно-трехосному сжатию образцов, отобранных из пластов-флюидоупоров. Если проведение таких экспериментов невозможно, следует ограничиться многостадийными псевдотрехосными тестами.

Другими важными параметрами для анализа являются локальный и осредненный предел прочности на растяжение. Эти параметры могут быть восстановлены с использованием специальных методов лабораторных исследований, основанных на создании локального поля растягивающих напряжений в образце [Dubinya et al., 2018; Novikova et al., 2023]. Такие испытания также следует включить в оптимальный комплекс лабораторных исследований для определения механических свойств пластов-флюидоупоров, которые используются не только при выборе целевого пласта, но и для дальнейшего контроля их состояния.

К перспективным направлениям развития лабораторного комплекса по изучению механических свойств можно отнести физическое моделирование распространения трещины в слоистой неоднородной среде. За основу можно взять существующие подходы к лабораторному моделированию развития трещины гидроразрыва [Reinicke et al., 2010], в рамках которых в образец, имитирующий исследуемую породу, закачивается флюид. К образцу подключаются датчики акустической эмиссии, что позволяет интерпретировать особенности роста трещины гидроразрыва. Следует рассмотреть возможность создания искусственных образцов, состоящих из двух частей: одна будет имитировать целевой пласт, а другая – пласт-флюидоупор. Образец будет помещен в условия сжатия, близкие к пластовым, оцененным по результатам геомеханического моделирования. Затем в часть образца, имитирующую целевой пласт, будет закачиваться флюид, имитирующий отходы бурения. Система пассивного акустического мониторинга позволит определить, при каких условиях произойдет

прорыв трещины или системы трещин в пласт-флюидоупор. Однако на текущем этапе такая экспериментальная система еще не разработана.

Таким образом, среди экспериментальных исследований керна можно выделить минимальный комплекс для выбора целевого пласта, включающий изучение транспортных свойств пласта-домена. В то же время, исследование механических свойств как целевого пласта, так и пластов-флюидоупоров следует отнести к оптимальному комплексу геофизических исследований, необходимому для выбора и контроля состояния пластов-флюидоупоров. Этот подход обеспечивает более точную оценку рисков и повышает надежность процесса закачки отходов бурения

Скважинные испытания

В эту категорию можно отнести контроль целостности ствола скважины и мониторинг давления.

При закачке отходов бурения крайне важно обеспечить как внутреннюю, так и внешнюю механическую целостность нагнетательных скважин. Согласно действующим нормативным документам, нагнетательная скважина считается обладающей механической целостностью, если отсутствуют значительные утечки через трубы, установленные внутри ствола скважины (например, насосно-компрессорные трубы или обсадные колонны), а также через пакер. Кроме того, не должно наблюдаться значительного движения закачиваемой жидкости за пределами ствола скважины, так как это может привести к загрязнению подземных источников воды. Целостность других скважин, расположенных в радиусе до 600 метров от нагнетательной скважины, также имеет большое значение для предотвращения нежелательного перемещения закачиваемых отходов за пределы целевого пласта и загрязнения подземных источников питьевой воды. Исследования, проведенные в [Bruno et al., 2000], показывают, что почти все случаи загрязнения в процессе закачки отходов связаны с плохой первичной цементацией соседних скважин, что приводит к сообщению между скважинами.

Некоторые авторы предлагают специальные рекомендации по бурению и заканчиванию нагнетательных скважин, чтобы обеспечить выполнение требований процесса закачки отходов и сохранить механическую и гидравлическую целостность. Например, инженеры рекомендуют учитывать особенности выбранного геологического пласта при проектировании скважин. Это может включать увеличение диаметра пробуренной скважины по сравнению с обсадной колонной для создания более толстой цементной оболочки, снижение скорости бурения на участках длиной не менее 75 метров для предотвращения выноса пластового песка, а также глубокую перфорацию для улучшения связи между нагнетательной скважиной и целевым пластом [Arfie et al., 2005]. В районах с вечной мерзлотой, где отсутствуют источники питьевой воды, риск загрязнения грунтовых вод минимален [Marinello et al., 2001].

Закачанные отходы могут покинуть зону захоронения через неправильно зацементированный ствол скважины, микроканалы за пределами обсадной колонны, трещины, пересекающие ствол скважины, зоны разломов или путем преодоления границы пласта-флюидоупора. Для предотвращения таких сценариев необходимо использовать систему мониторинга, которая позволит своевременно выявлять и устранять потенциальные угрозы.

Мониторинг процесса закачки шламовых отходов может включать несколько методов: активный мониторинг процесса закачки на одной скважине (температура и давление закачки, объем закачки и реология шлама); мониторинг на забое (использование радиоактивных трассеров, измерителей наклона забоя, температурных исследований и электромагнитных измерений); тестирование реакции пласта (измерение забойного давления); а также дистанционный мониторинг с использованием микросейсмических явлений, деформации поверхности (измерители наклона поверхности) или данных из соседних скважин [Fragachán et al., 2006; Guo et al., 2007]. За исключением мониторинга поверхностного и забойного давления, остальные методы предоставляют ограниченный объем данных или применимы только в определенные периоды

времени. Например, микросейсмические методы, несмотря на их высокую точность, часто считаются слишком дорогостоящими и используются преимущественно в крупных проектах [Fragachán et al., 2006]. Тем не менее, эти методы можно отнести к оптимальному комплексу контроля состояния пластов-флюидоупоров, особенно для условий небольших месторождений.

Микросейсмический мониторинг является точным методом для определения магистральной трещины и ее распространения, однако он имеет ограниченную возможность дифференциации сейсмических событий, вызванных различными источниками (например, распространением одной трещины или образованием ответвлений). Использование радиоактивных трассеров в закачиваемой пульпе и соответствующая программа каротажа могут быть крайне полезны для диагностики целевого пласта, особенно при определении интервалов закачки и их изменений в течение срока эксплуатации проекта.

Несмотря на преимущества перечисленных методов, мониторинг давления закачки остается наиболее важным источником информации для контроля состояния пластов-флюидоупоров. При постоянном потоке давление нагнетания может изменяться в процессе закачки шламовых отходов из-за роста трещин и изменения локального напряжения. Рост трещин и тепловые изменения, вызванные закачкой более холодного шлама, приводят к снижению давления закачки, в то время как увеличение порового давления и накопление твердых частиц в пласте оказывают противоположный эффект.

Давление закачиваемого флюида позволяет оценить текущее состояние пласта. Существующие методики [Barree, 1998; Barree et al., 2007] позволяют интерпретировать зависимость давления закачиваемого флюида от времени при известном темпе закачки для определения критических параметров, характеризующих распространение трещины: LOP (давление начала утечки), FBP (давление разрыва пласта), FPP (давление распространения трещины), ISIP (мгновенное давление закрытия) и FCP (давление закрытия трещины). Мгновенное давление закрытия часто интерпретируется как минимальное горизонтальное

напряжение в пласте [Nickman, Zoback, 1983], и его значение ниже, чем давления разрыва пласта и распространения трещины. Таким образом, можно утверждать, что до тех пор, пока давление закачки отходов бурения в целевой пласт остается ниже минимального напряжения в пласте-флюидоупоре, прорыв трещины маловероятен. Минимальное напряжение в флюидоупоре может быть использовано в качестве операционного предела давления закачки. Однако для более точного определения максимально допустимого давления закачки необходимо учитывать механические свойства пластов-флюидоупоров и использовать подходы механики хрупкого разрушения. В работе [Моисеенков и др., 2024] на основе аналитического решения, полученного с использованием положений механики хрупкого разрушения [Wasantha et al., 2018], было определено давление, при котором происходит прорыв пласта-флюидоупора. Это давление зависит от трещиностойкости (локального предела прочности на растяжение) пласта-флюидоупора, мощности целевого пласта, минимального горизонтального напряжения в пласте-домене и в пласте-флюидоупоре. При этом минимальное горизонтальное напряжение в целевом пласте зависит от истории закачки, что делает максимально допустимое давление сложной функцией, изменяющейся со временем. По мере продолжения закачки максимально допустимое давление может сравняться с давлением распространения трещины в пласте-флюидоупоре, что приведет к техническому пределу закачки. Если давление закачки превышает это значение, прорыв трещины становится неизбежным.

Таким образом, можно выделить два критических значения давления закачки: операционный предел, равный минимальному главному напряжению в пласте-флюидоупоре, и технический предел, равный давлению распространения трещины в пласте-флюидоупоре. Скважинные испытания позволяют контролировать текущее состояние целевого пласта и пластов-флюидоупоров, что дает возможность определять безопасное давление закачки и принимать решения о переходе на другие пласты. Контроль давления в ходе закачки можно отнести к

минимальному комплексу геофизических исследований для мониторинга состояния пластов-флюидоупоров. Все перечисленные методы геофизических исследований были обобщены в таблице 2.1, где указаны минимальный и оптимальный наборы исследований, используемых для выбора целевого пласта, контроля его состояния и состояния пластов-флюидоупоров. В оптимальный комплекс входят все исследования, включенные в минимальный комплекс, а также дополнительные методы, повышающие точность и надежность мониторинга.

Предложенное распределение методов и подходов основано на результатах анализа литературных источников и может не являться единственно верным или универсальным решением. В данном случае отсутствуют строгие и однозначные критерии оптимальности того или иного комплекса исследований. Как отмечалось в работе [de Almeida et al., 2017], вопросы оптимизации системы переработки и утилизации отходов бурения должны рассматриваться комплексно, с учетом технологических, экологических и экономических аспектов [Darajah et al., 2021; Keck et al., 2002]. На сегодняшний день не существует полноценного математического аппарата, который мог бы доказать, что предлагаемый комплекс исследований является оптимальным с точки зрения всех перечисленных критериев. Однако можно утверждать, что в данном контексте под оптимальностью системы понимается получение максимально возможного объема информации, которая позволяет не только выбирать подходящие пласты в качестве целевых для закачки отходов бурения, но и достоверно прогнозировать условия, при которых может произойти прорыв в пласты-флюидоупоры.

На основании рассмотренных методов геофизического контроля можно сформулировать краткие рекомендации по организации системы мониторинга и контроля целостности пластов-флюидоупоров. Во-первых, необходимо обеспечить комплексный подход к сбору данных, включающий как стандартные, так и расширенные методы геофизических исследований. Это позволит получить более полную картину состояния пластов и минимизировать риски, связанные с закачкой отходов. Во-вторых, важно регулярно проводить мониторинг давления закачки и

других ключевых параметров, таких как температура и реологические свойства закачиваемой жидкости. Это поможет своевременно выявлять изменения в состоянии пласта и принимать корректирующие меры. В-третьих, рекомендуется использовать современные методы мониторинга, такие как микросейсмические исследования и радиоактивные трассеры, которые позволяют более точно отслеживать распространение трещин и движение закачиваемой жидкости [Moiseenkov et al., 2021].

Кроме того, следует учитывать, что система мониторинга должна быть адаптирована к конкретным условиям месторождения, включающим геологические особенности, климатические условия и наличие инфраструктуры. Это позволит повысить эффективность системы и снизить затраты на ее реализацию. Важно также учитывать экономическую составляющую, так как внедрение дорогостоящих методов мониторинга может быть оправдано только в случае их значительного вклада в повышение безопасности и надежности процесса закачки отходов.

Таким образом, предложенные рекомендации направлены на создание сбалансированной системы мониторинга, которая сочетает в себе технологическую эффективность, экологическую безопасность и экономическую целесообразность. Такой подход позволит не только минимизировать риски, связанные с закачкой отходов бурения, но и обеспечить долгосрочную устойчивость эксплуатации месторождений.

В работе [Береснев и др., 2023] описана разработанная с учетом условий шельфа острова Сахалин система мониторинга и контроля целостности пластов-флюидоупоров для водонагнетательных скважин с закачкой воды в режиме авто-ГРП. Предложена программа, состоящая из следующих элементов:

1. Геомеханический анализ и оценка прочностных свойств пластов-флюидоупоров, включающие определение безопасных технологических режимов закачки на основе минимального горизонтального напряжения (σ_h) и позволяющие учитывать консервативные сценарии, такие, например, как наличие природных

трещин и разломов, и оценка давления в трещинах с использованием данных ISIP-тестов, и анализ потерь давления на трение.

2. Оптоволоконный температурный контроль (DTS) включающий применение распределенной термометрии для непрерывного мониторинга температуры по стволу скважины.

3. Каротаж спектральной шумометрии и высокочувствительной термометрии в закрытом стволе скважины, позволяющий оценивать рост трещин авто-ГРП [Moiseenkov et al., 2021, Al Isaei et al., 2022, Smirnov et al., 2022], а также калибровать данные шумометрии, термометрии и DTS для подтверждения точности мониторинга.

4. 4D-сейсмомониторинг, который, в частности, использует сейсмические данные для оценки динамических изменений в пластах, включающих продвижение фронта воды, выделение газа и изменение порового давления. Отсутствие 4D-сигналов в вышележащих пластах, свидетельствует о сохранении целостности флюидоупоров.

5. Внедрение новых технологий - пилотный проект оптоволоконного 3D-ВСП (DAS) для повышения разрешения сейсмических данных, развитие других геофизических технологий с получением высококачественных данных, открывающих новые возможности для мониторинга.

Показано, что разработанный комплекс методов мониторинга позволяет эффективно отслеживать состояние пластов-флюидоупоров и целевого пласта, минимизируя экологические риски, связанные с возможным прорывом трещин через пласты-флюидоупоры при закачке воды в режиме авто-ГРП, но по мнению автора ввиду схожести процессов закачки также может быть применим для мониторинга скважин при закачке отходов бурения [Keck et al., 2002]. Применение четырехмерного сейсмического мониторинга (4D-сейсмомониторинга) для водонагнетательных скважин обеспечивает решение широкого круга задач, таких как контроль продвижения фронта закачиваемой воды, анализ высвобождения растворенного газа из нефти вследствие снижения пластового давления, а также

мониторинг изменений самого пластового давления. Эти данные позволяют оперативно реагировать на изменения в пластах и корректировать технологические режимы эксплуатации скважин. Для специальных поглощающих скважин, используемых для захоронения технологических отходов и отходов бурения, 4Д сейсмомониторинг также применим ввиду того, что позволяет отслеживать развитие и структуру систем трещин, их вертикальное и латеральное распространение.

Согласно перечисленным выше комплексам геофизических исследований, были также проведены работы по вертикальному сейсмическому профилированию (ВСП) с использованием оптоволоконных технологий. В рамках этих работ распределенные оптоволоконные датчики температуры (DTS) были переведены в режим регистрации акустических сигналов (DAS), что позволило значительно повысить точность и детализацию получаемых данных. Результаты проведенных исследований продемонстрировали высокую эффективность этого подхода: удалось с достаточной точностью охарактеризовать геометрические особенности пространства призабойной зоны целевого пласта, в частности, оценить эффективную высоту трещины гидроразрыва. Это подтвердило, что трещины локализованы в пределах целевых интервалов и не распространяются в вышележащие пласты-флюидоупоры.

Необходимо учитывать, что в условиях многократной закачки отходов бурения в один и тот же пласт классическая трещина гидроразрыва не формируется [Keesk et al., 2002]. Вместо этого происходит развитие зоны трещиноватости в окрестности точки нагнетания, что подтверждается исследованиями [Zhang et al., 2022]. В связи с этим интерпретация результатов геофизических исследований, особенно сейсмических, должна основываться на принципах механики эффективных сред. Это предполагает рассмотрение околоскважинного пространства как трещиноватой среды, которая характеризуется такими параметрами, как плотность трещин, их пространственные ориентации, связность включений и другими. Стоит отметить, что на сегодняшний день уже разработаны

численные модели, способные для заданных распределений механических свойств и граничных условий строить модельные распределения трещин [Nwonodi et al., 2024]. Кроме того, активно применяются подходы теории эффективных сред для вероятностной оценки этих параметров [Баяк и др., 2019]. Эти методы позволяют более точно прогнозировать поведение геологической среды при закачке отходов бурения.

Перспективным направлением является организация системы пассивного микросейсмического мониторинга в процессе закачки отходов бурения в целевые пласты. Для реализации этой задачи рекомендуется использовать распределенные акустические датчики, которые позволяют регистрировать микросейсмические события, сопровождающие разрушение геологической среды. Специальные методы интерпретации данных, получаемых с таких датчиков, дают возможность локализовать очаги микросейсмической активности и определить их параметры. Для повышения точности мониторинга целесообразно совместное использование распределенных датчиков температуры и акустических сигналов, что позволяет получить более полную картину изменений в геологической среде. Интерпретация данных должна проводиться с применением петроупругих моделей, которые настраиваются на основе имеющихся данных, что соответствует ранее упомянутым принципам механики эффективных сред.

Обязательно необходимо развивать математические модели, описывающие изменение порового давления и напряженно-деформированного состояния целевого пласта, а также пластов-флюидоупоров. В работе [Моисеенков и др., 2024], которая подробно рассмотрена в следующем разделе, представлены первые шаги к созданию сопряженной модели. Эта модель способна прогнозировать, как в процессе закачки отходов бурения будут изменяться давление, необходимое для начала закачки, и давление, предотвращающее прорыв пласта-флюидоупора. Важным аспектом является адаптация параметров закачки, включающая подбор оптимальных интервалов времени между закачками и объемов закачиваемого бурового шлама. Решение этой задачи позволит не только увеличить объемы

отходов, которые могут быть приняты целевым пластом, но и повысить экономическую эффективность процесса утилизации. Кроме того, успешная реализация двух предыдущих задач (интерпретация геофизических данных и организация микросейсмического мониторинга) позволит значительно снизить экологические риски, связанные с освоением морских месторождений и утилизацией отходов бурения. Это особенно важно в условиях ужесточения экологических норм и требований к безопасности при разработке месторождений.

Таким образом, комплексный подход, включающий применение современных геофизических методов, развитие математических моделей и внедрение систем мониторинга способны не только повысить эффективность утилизации отходов бурения, но и исключить или минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

2.5.2 Визуализация процесса мониторинга поглощающих скважин

Для каждого пласта может быть определен предел прочности самого пласта и покрывающего флюидоупора. В процессе закачки при достижении в пласте давления, равного пределу давлению распространения трещины во флюидоупоре, необходимо переводить закачку на другой пласт. Для удобства на основе расчётных пределов и получаемых данных по фактическим закачкам может быть использована система визуализации для контроля размещения и подтверждения целостности флюидоупора (рисунок 2.3). В частности, для наглядной визуализации могут быть использованы различные цвета заливки областей на схеме, 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.

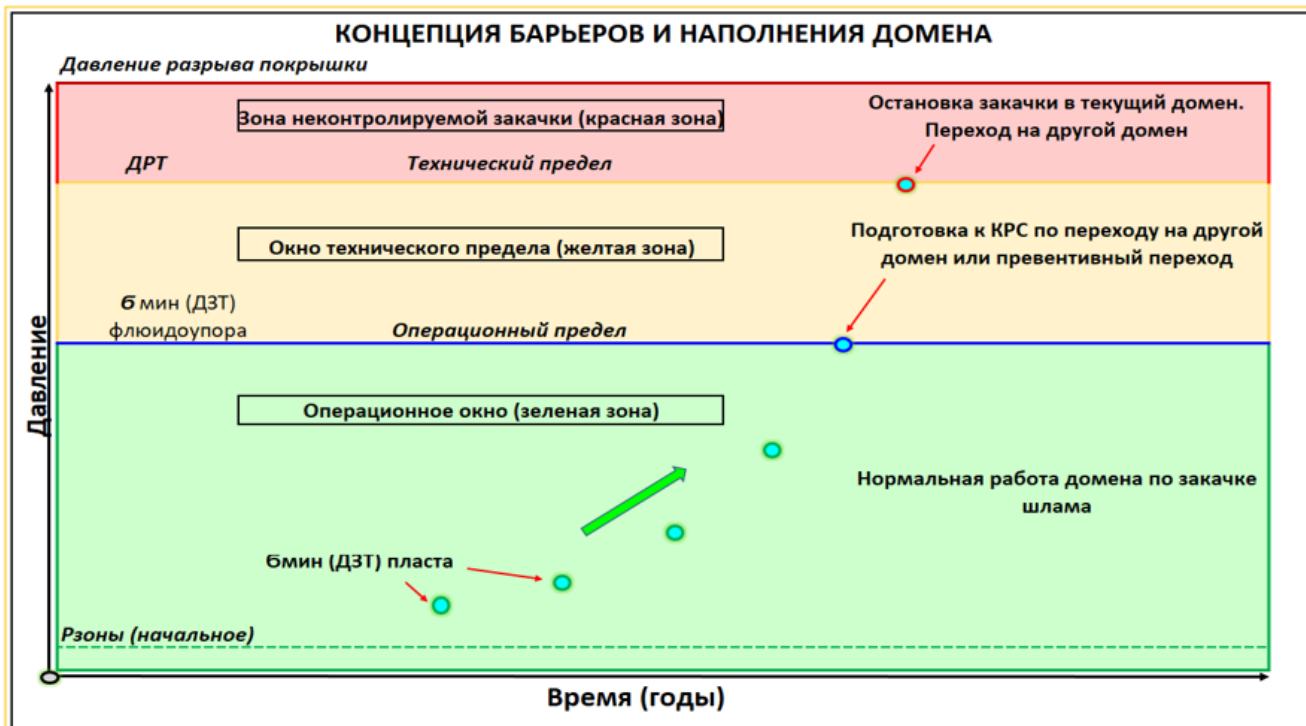


Рисунок 2.3 Визуализация технологических режимов и процесса наполнения домена (роста внутренних напряжений)

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 достигать 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.

По достижении давлением в пласте значений равных или превышающих давление распространения трещины во флюидоупоре, закачки переходят в неконтролируемый режим. Закачка при давлениях, находящихся в красной зоне, является неконтролируемой с точки зрения поддержания целостности покрышки флюидоупора, и при достижении этой зоны закачка буровых и технологических

отходов в текущий пласт должна быть прекращена. В случае больших по толщине флюидоупоров (десятки метров) разрыв флюидоупора может происходить довольно продолжительное время. Однако, трещина все равно будет стремиться развиваться в сторону наименьших напряжений (как правило вверх) и со временем прорвётся через покрывку флюидоупор. Незначительные же по толщине покрывки могут полностью прорваться довольно быстро.

Для определения текущего давления (напряжения) в пласте используют давление закрытия трещины, показывающее текущее напряжение в пласте [Gaarenstroom et al., 1993]. Постепенно наблюдается рост давления закрытия трещины, которое в перспективе достигает рабочих и технических пределов. В компании «Сахалинская Энергия» разработана система мониторинга давлений закрытия трещины и сравнение этих значений с установленными пределами. Также на основе тренда роста напряжений в пласте происходит прогноз объемов под возможное размещение в текущем пласте-домене.

2.5.3 Контроль целостности покрывок флюидоупоров

Своевременное планирование и выполнение промыслово-геофизических исследований в рамках ежегодных геолого-технических мероприятий и при капитальном ремонте скважин позволяет минимизировать и контролировать риски. В случае выявления негативных тенденций появляется возможность проактивно принять меры по их устранению, что положительно влияет на временные рамки реализации проекта и его экономические показатели. Периодичность проведения исследований строго не регламентирована, но в практике принято выполнять их раз в 2-3 года при нормальной эксплуатации скважин или ранее по требованию в случае отклонений в работе скважин или подозрений на нарушение целостности скважин или флюидоупоров. Также внеплановые исследования проводятся при возникновении предпосылок для рисков.

Далее представлен пример реализации программы контроля для специальных поглощающих скважин. Рассмотрим реализацию программы промыслово-геофизического контроля на примере скважины, расположенной на Пильтунском участке Пильтун-Астохского месторождения. На графическом планшете рисунок 2.3 представлены: глубина (трек 1), объемная петрофизическая модель (трек 2), дискретная литотипизация (трек 3), конструкция скважины (трек 4), начальное азимутальное распределение акустического импеданса цемента за хвостовиком 178 мм (трек 5), азимутальное распределение начальной толщины стенки хвостовика 178 мм (трек 6), фазо-корреляционная диаграмма акустической цементометрии (трек 7), индекс сцепления по данным акустической цементометрии (трек 8), средняя объемная толщина стенки по данным магнитно-импульсной дефектоскопии (измерения 2019 и 2022 гг.), номинальная толщина стенки и стандартное отклонение для хвостовика 178 мм (трек 9), средняя объемная толщина стенки по данным магнитно-импульсной дефектоскопии (измерения 2019 и 2022 гг.), номинальная толщина стенки и стандартное отклонение для НКТ 127 мм (трек 10), данные спектральной шумометрии при закачке 2019 г. (трек 11), данные спектральной шумометрии при закачке 2022 г. (трек 12), данные высокоточной термометрии при закачке и остановке 2019 г. (трек 13), данные высокоточной термометрии при закачке и остановке 2022 г. (трек 14).

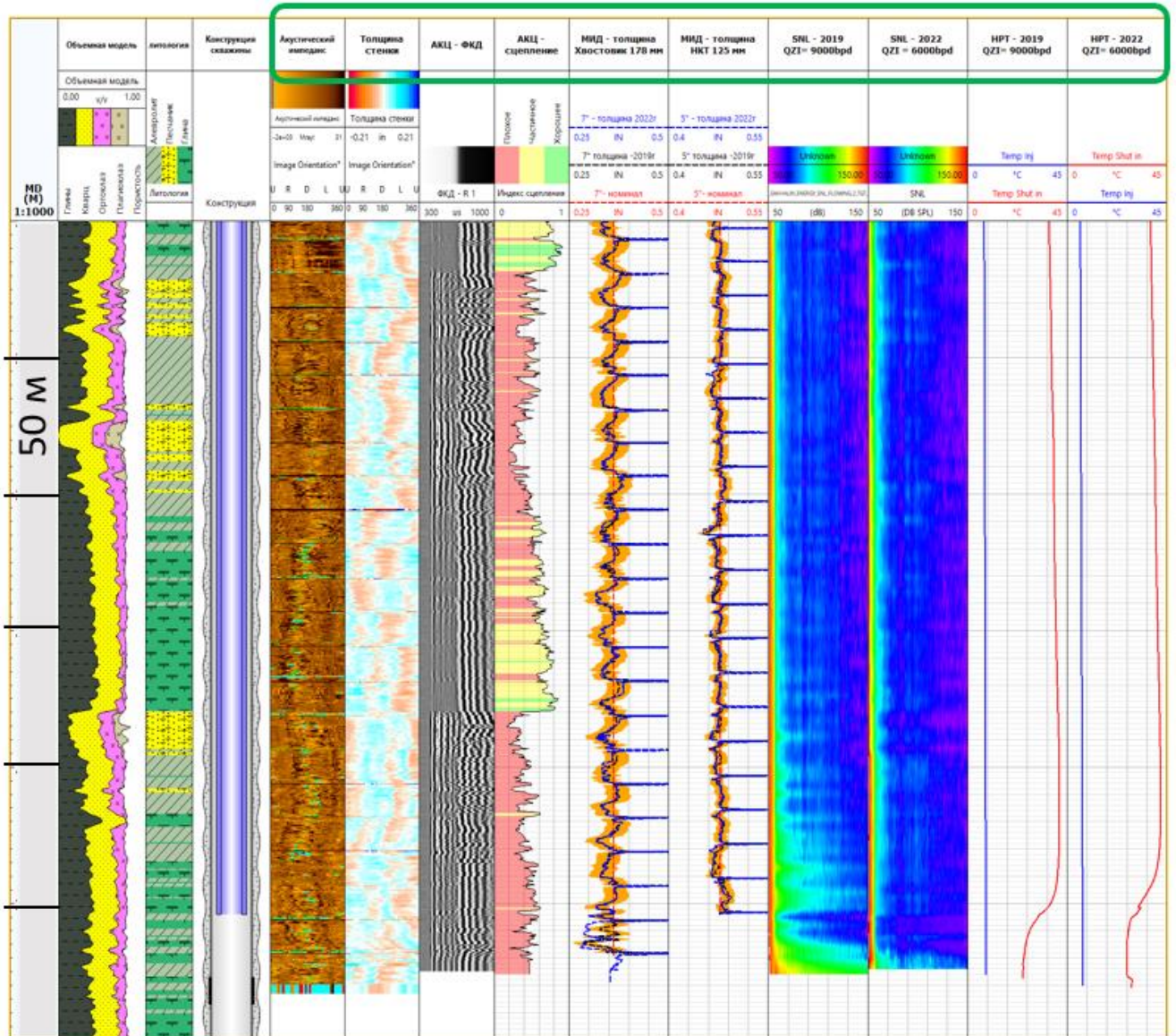


Рисунок. 2.4 Сводный геофизический планшет с данными по скважине для утилизации отходов бурения.

По результатам анализа данных закачка осуществляется в терригенные породы нутовской свиты миоценового возраста, характеризующиеся сложной неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств. Для пород характерна сложная морфология пустотного пространства, включающая микро- и мезопористость, связанную с глинистыми минералами и обломками вулканических пород, а также частичным выщелачиванием плагиоклазов и калиевых полевых шпатов. Породы классифицируются как аркозовые и лититовые арениты.

Высокие значения акустического импеданса указывают на хорошее начальное заполнение заколонного пространства цементом, но с наличием канала. Толщина стенки соответствует номиналу с допустимыми отклонениями. Акустическая цементометрия указывает на преобладание частичного и плохого типа сцепления цемента с обсадной колонной, что подтверждает наличие канала в цементном камне. Данные магнитно-импульсной дефектоскопии показывают развитие эрозии вблизи интервала перфорации, вероятно связанной с движением жидкости по трещине гидроразрыва и каналу в цементном камне. Толщина стенки НКТ соответствует номиналу с допустимыми отклонениями.

Разновременные замеры спектральной шумометрии и высокоточной термометрии характеризуют положение трещины и наличие заколонного перетока по каналу в цементном камне в направлении вышележащего песчаника.

2.5.4 Прогнозирование наполнения пластов-доменов

Визуальный оперативный контроль целостности покрышек флюидоупоров проводится с использованием программного обеспечения, которое позволяет визуально отследить текущее состояние и все отклонения от установленных пределов (рисунок 2.4). После остановки закачки происходит дальнейший мониторинг давления в скважине. По тренду падения давления определяют давление закрытия трещины, которое показывает текущее напряжение в пласте. Если текущее давление закрытия трещины меньше установленных пределов, то закачка в дальнейшем продолжается в штатном режиме. Если же давление приближается к установленным пределам, то заранее планируются работы по капитальному ремонту скважины для перехода на вышележащий пласт, бурение бокового ствола или новой поглощающей скважины. Более подробно прогнозирование наполнения пластов-доменов контроля флюидоупоров на реальных данных описаны в Главе 4.

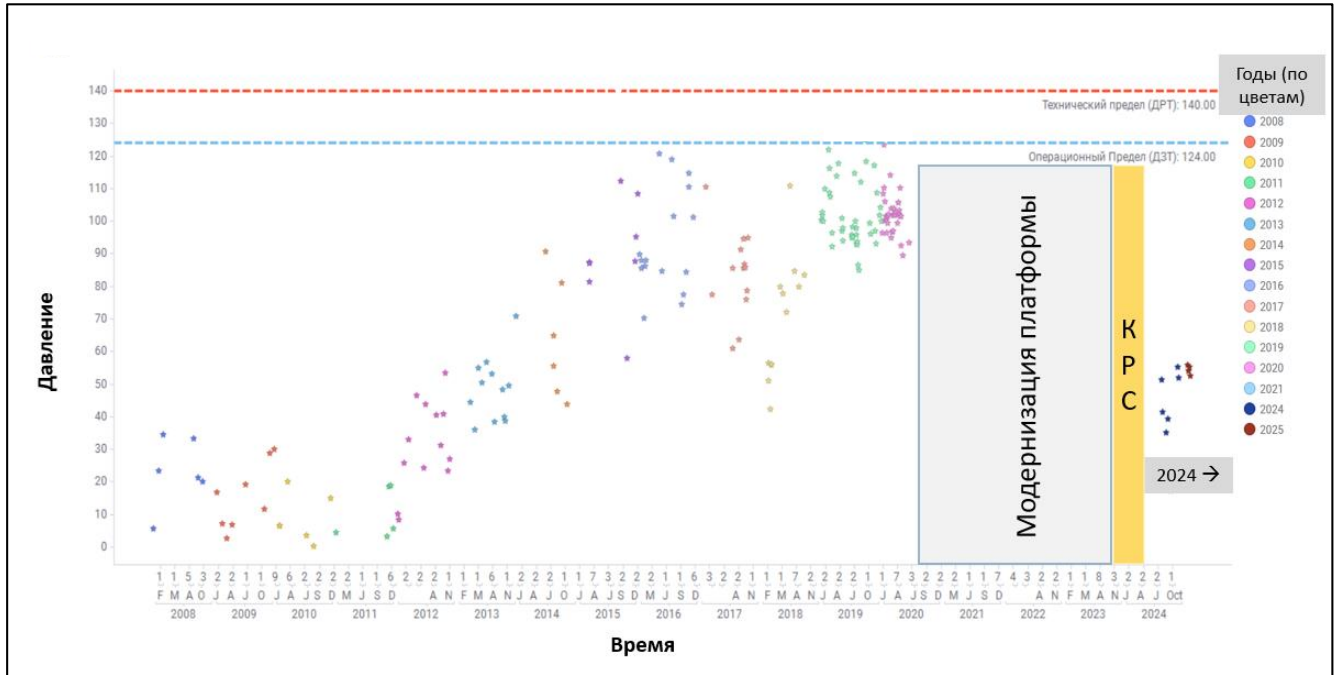


Рисунок 2.5 График зависимости давлений закрытия трещины времени и переход на другой домен, на примере скважины С-18 Астохского участка Пильтун-Астохского месторождения. Из ПО «eWellBook».

2.6 Заключение по главе 2

Практическая реализация обратной закачки отходов бурения в целевые пласты в условиях морских месторождений сопряжена со значительными экологическими рисками. В данном разделе были предложены комплексные решения по организации геофизических систем мониторинга и контроля, основанных на сейсмических съемках, геофизических исследованиях скважин, лабораторных исследованиях образцов горных пород, отобранных не только из целевых интервалов, но и из пластов-флюидоупоров, скважинных испытаний. Говорить о минимизации геологических и экологических рисков при закачке (размещении) отходов бурения и технологических жидкостей в глубокие горизонты недр можно только в том случае, если описанные в данной работе методы исследований используются в комплексе.

В ходе выполнения работы были исследованы различные системы геофизического исследования и мониторинга целевых пластов и пластов-

флюидоупоров, позволяющие выполнять закачку (размещение) отходов бурения и технологических жидкостей с минимальными геологическими и экологическими рисками.

Очевидно, что привлечение данных дополнительных методов геофизического мониторинга, осуществляемого на разных пространственных и временных масштабах, как правило, должно приводить к повышению точности оценок состояния среды. Однако, среди методов геофизического мониторинга можно выделить более и менее информативные для решения задачи выбора объектов мониторинга состояния пластов флюидоупоров. В главе это выделение было реализовано в виде рекомендаций по организации системы комплексного геофизического мониторинга, включающей минимальный и оптимальный комплексы исследований. Использование оптимальной системы мониторинга позволяет контролировать состояние пластов-флюидоупоров и снижать риски их прорыва [Saasen et al., 2001], сопряженные с потенциальными геологическими опасностями, что позволяет сформулировать защищаемое положение 2:

Оперативный визуальный контроль наполнения пластов-доменов и целостности флюидоупоров: программный комплекс, использующий геомеханическую модель поглощающего пласта и флюидоупоров с заранее рассчитанными операционными и техническими пределами, обеспечивает высокоточный мониторинг в реальном времени. Это позволяет оперативно отслеживать наполнение пластов-доменов и подтверждать сохранение целостности флюидоупоров, снижая эксплуатационные риски.

Программа реализации размещения отходов бурения и технологических жидкостей, как и система комплексного геофизического мониторинга, позволяют минимизировать геологические и экологические риски утилизации отходов бурения в условиях труднодоступных морских месторождений.

Глава 3. Концепция обеспечения целостности флюидопоров

Для успешной реализации закачки (размещения) отходов бурения и технологических жидкостей в глубокие горизонты недр необходимо не только проводить комплексный геофизический мониторинг состояния целевого пласта и пластов-флюидопоров, но и иметь возможность проведения моделирования, позволяющего прогнозировать состояние объектов геофизической системы при различных сценариях закачки. Для решения этой задачи была подготовлена упрощенная математическая модель процесса. Одними из ключевых требований к этой модели являются быстроедействие и адаптивность, основанная на возможности осуществления практически непрерывного контроля состояния целевого пласта и пластов-флюидопоров.

3.1 Технический и операционный пределы

Технические (проектный) и операционные (рабочие) пределы для флюидопора в скважине определяются в момент остановки работы скважины. Во время процесса закачки в НТК последовательно закачиваются различные жидкости с различающимися физическими и реологическими свойствами, и это может значительно влиять на гидростатическое давление в стволе скважины и давление сопротивления по стволу скважины. Также возможны закачки смесей в различных пропорциях, что дополнительно усугубляет ситуацию, так как гидростатические давления и потери на трение изменяются динамически и не являются константами. Таким образом, технические и рабочие режимы для флюидопоров целесообразно определять во время остановки закачки в скважину, когда не происходит динамического изменения в составе жидкости и гидростатическом давлении, по всему стволу находится жидкость с заранее известными физическими свойствами, и реология ввиду остановки работ на скважине не влияет на значения давлений.

Сопоставляя изменения давлений в пласте-флюидопоре с их исходными референсными значениями и с установленными пределами, возможно отслеживать тренд наполнения пластов-доменов.

Во время эксплуатации специальных поглощающих скважин при закачке отходов бурения и технологических жидкостей, необходимо соблюдать принципы недопущения условий прорыва флюидопора и предпринимать корректирующие действия в случае приближения к точке пересечения пределов проектных-технологических режимов, чтобы было достаточно времени на реагирование, например, переход на другой интервал закачки, длительный перерыв в функционировании скважины на релаксацию домена и прочее.

Требования к мониторингу и рекомендации по визуализации, описанные в этой и предыдущей главах, позволяют легко отслеживать состояние зон закачки отходов и планировать график будущих мероприятий. Также результаты мониторинга могут использоваться в качестве инструмента верификации остаточных объемов для закачки.

Цель данного раздела состоит в следующем:

1. Определение технического (проектного) и операционных (рабочих) пределов специальной поглощающей скважины
2. Требования к контролю операционных режимов

Для перепродавки после завершения порционной закачки пульпы используется однородная жидкость с известными физическими свойствами, на морских проектах применяется морская вода. Следовательно, для морских проектов в качестве ρ_0 необходимо использовать плотность морской воды, принятой $\rho_0 = 1.02 \text{ г/см}^3$, $g = 9.816 \text{ м/с}^2$.

3.1.1 Определение технического и операционного пределов для специальных поглощающих скважин при закачке бурового шлама и технологических жидкостей

В работе по характеристике были приняты следующие предпосылки:

1. Исходные условия давления и напряжений

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:

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

2. Определение минимального горизонтального напряжения

Минимальное горизонтальное напряжение ($\sigma_{мин}$) может быть определено как давление закрытия трещины (ДЗТ) [Nickman, Zoback, 1983]. Это значение является наиболее точным приближением для $\sigma_{мин}$.

3. Условия для зоны размещения под флюидоупором

Если перфорация (зона размещения) находится непосредственно под флюидоупором, то для корректного сравнения характеристик прочности флюидоупора (ДЗТ и ДРТ) необходимо привести их к глубине верха перфорации. Это выполняется с использованием коэффициентов контраста напряжений:

$$ДЗТ_{флюидоупора} (перфорация) = K_{ДЗТ} * ДЗТ_{флюидоупора} (подошва),$$

где $K_{ДЗТ} = ДЗТ_{флюидоупора} / ДЗТ_{пласта}$ – коэффициент контраста напряжений.

Аналогично для давления распространения трещины ДРТ:

$$ДРТ_{флюидоупора} (перфорация) = K_{ДРТ} * ДРТ_{флюидоупора} (подошва),$$

где $K_{ДРТ} = ДРТ_{флюидоупора} / ДЗТ_{пласта}$.

4. *Изменение напряжений в пласте*

В процессе закачки поровое давление в пласте увеличивается, что приводит к росту статических значений напряжений (ДЗТ пласта) из-за поро-упругого эффекта. Однако во флюидоупоре изменения напряжений (ДЗТ флюидоупора) практически отсутствуют ввиду его низкой проницаемости, особенно на удалении от перфорации.

5. *Контраст напряжений*

Если значения коэффициентов $K_{ДЗТ}$ и $K_{ДРТ}$ равны 1, контраст напряжений между флюидоупором и пластом нивелируется. При значениях меньше 1 контраст становится отрицательным, что создает условия для развития трещин в флюидоупоре и, в конечном итоге, прорыва барьера.

6. *Пересчет напряжений на поверхность*

Напряжения в пласте (ДЗТ пласта) и характеристики прочности флюидоупора (ДЗТ и ДРТ) могут быть пересчитаны на поверхность с использованием следующих уравнений:

$$P(S) = P^* (\text{перфорация}) - P_{\text{гидр}}^*,$$

где $P_{\text{гидр}} = \rho_0 \times g \times H$ – гидростатическое давление; $P(S)$ – давление на поверхности; P^* (перфорация) – давление на уровне перфорации; ρ_0 – удельная плотность флюида (для морской воды $\rho_0 = 1.02 \text{ г/см}^3$); g – ускорение свободного падения (9.816 м/с^2); H – высота столба жидкости от поверхности до верха перфорации.

При использовании предлагаемой концепции были сделаны следующие допущения:

Флюидоупор — это более прочный непроницаемый пласт, расположенный над пластом-коллектором и может использоваться в качестве барьера при закачке буровых отходов и технологических жидкостей. Неконтролируемая закачка происходит при нарушении целостности флюидоупора.

Термо-упругий эффект при закачке отходов не учитывается из-за малых объемов и порционной закачки, с достаточным периодом остановки и восстановления пластовой температуры.

Динамический поро-упругий эффект не учитывается из-за кратковременности порционных закачек, так-как утечки во время закачки жидкостей с разными вязкостными характеристиками считаются динамическими и сложно прогнозируемыми.

Статический поро-упругий эффект в пласте-домене учитывается при определении давления закрытия трещины ($DЗТ_{пласта}$). В пласте-флюидоупоре этот эффект не учитывается из-за низкой проницаемости флюидоупора.

Давления $DЗТ_{пласта}$, $DЗТ_{флюидоупора}$ и $DРТ_{флюидоупора}$ определяются для каждой зоны размещения на основе данных ГИС скважин или геомеханической модели месторождения.

Предполагается, что трещины авто-ГРП распространяются латерально в пределах зоны закачки из-за более низкого минимального горизонтального напряжения в пластах-коллекторах по сравнению с флюидоупором.

Давление закрытия трещины ($DЗТ_{пласта}$) используется как основной индикатор для мониторинга целостности флюидоупоров. Давление закрытия трещины, измеренное в момент закрытия трещины, может использоваться для оперативного контроля за наполнением пласта-домена ($DЗТ_{пласта}$).

Технологические режимы должны быть установлены таким образом, чтобы давление закрытия трещины в пласте не превышало минимального горизонтального напряжения флюидоупора (операционный предел) или давления распространения трещины во флюидоупоре (технический предел). Все режимы могут рассчитываться как на уровень пласта, при наличии забойных датчиков, так и на поверхностные условия при отсутствии забойных датчиков, но с датчиками давления на поверхности. При забойных датчиках измерения проводятся напрямую, но с учетом расположения датчика ниже или выше подошвы флюидоупора. Если же забойные датчики отсутствуют, и расчеты делаются на поверхностные условия, необходимо учитывать гидростатические давления.

Пределы по давлению для подземного и наземного оборудования скважины должны контролироваться на поверхности в режимах закачки.

Пределы давлений и напряжений относительно флюидопоров контролируются после остановки закачки и закрытия трещины. В этих условиях течение жидкости из режима авто-ГРП переходит в режим течения в пласте. В таком случае происходит распределение жидкости по пласту, вначале линейное от стенок трещины в пласт и затем радиальное от скважины в пласт, рисунок 3.1. В таких условиях напряжения в пласте вокруг скважины остаются относительно стабильными.

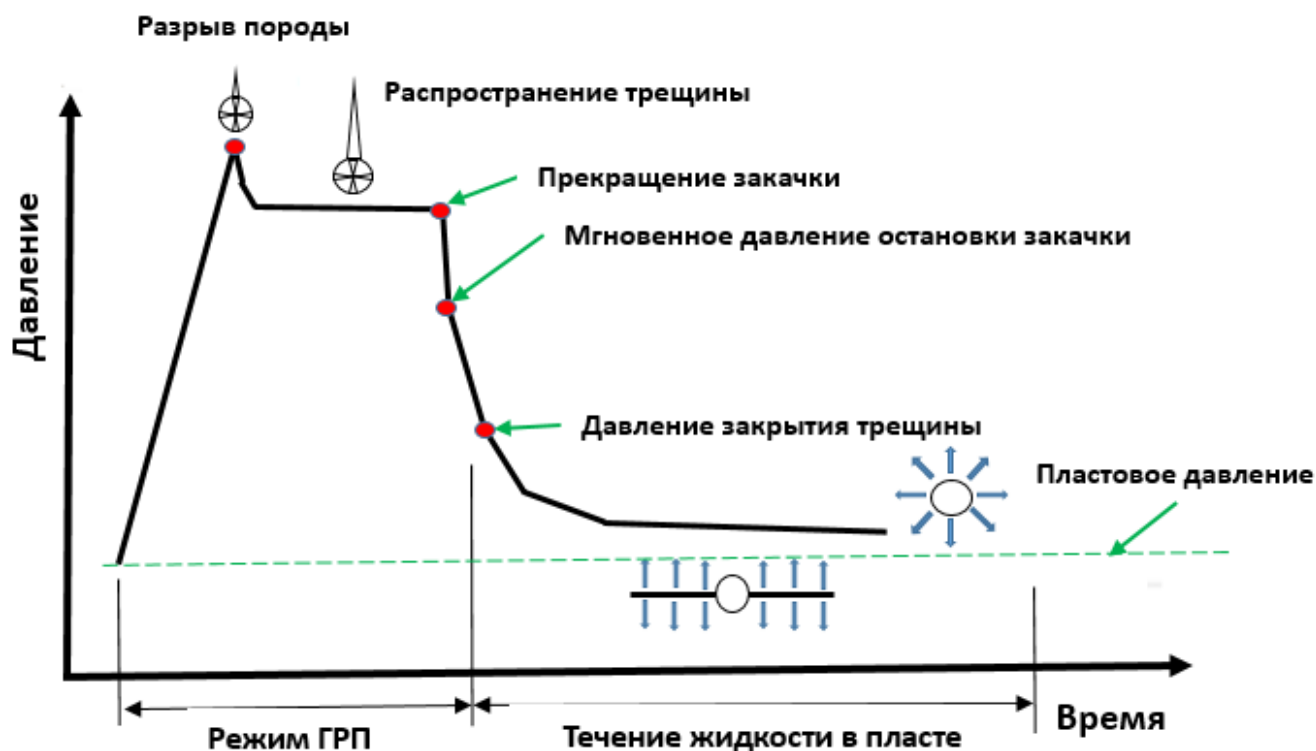


Рисунок 3.1 Процессы образования и закрытия трещины. Режимы течения жидкости в пласте.

Учет перечисленных условий, ограничений и предположений помогает сформулировать концептуальный подход к определению напряженного состояния пласта и флюидопора и может быть использован для того, чтобы сформулировать рекомендации по выбору режима работы скважины. Основным требованием к снижению экологических рисков можно считать работы скважины в режиме, не допускающем прорыва трещиной, развивающейся в ходе закачки пласта-флюидопора. Необходимо проводить непрерывный мониторинг процесса роста

напряжений внутри целевого пласта-домена, так как закачка ведет к постепенному увеличению эффективного напряжения, действующего в пласте, и, как следствие, к изменению давлений раскрытия и закрытия трещины в домене. Соответствующие процессы схематически продемонстрированы на рисунке 3.2.

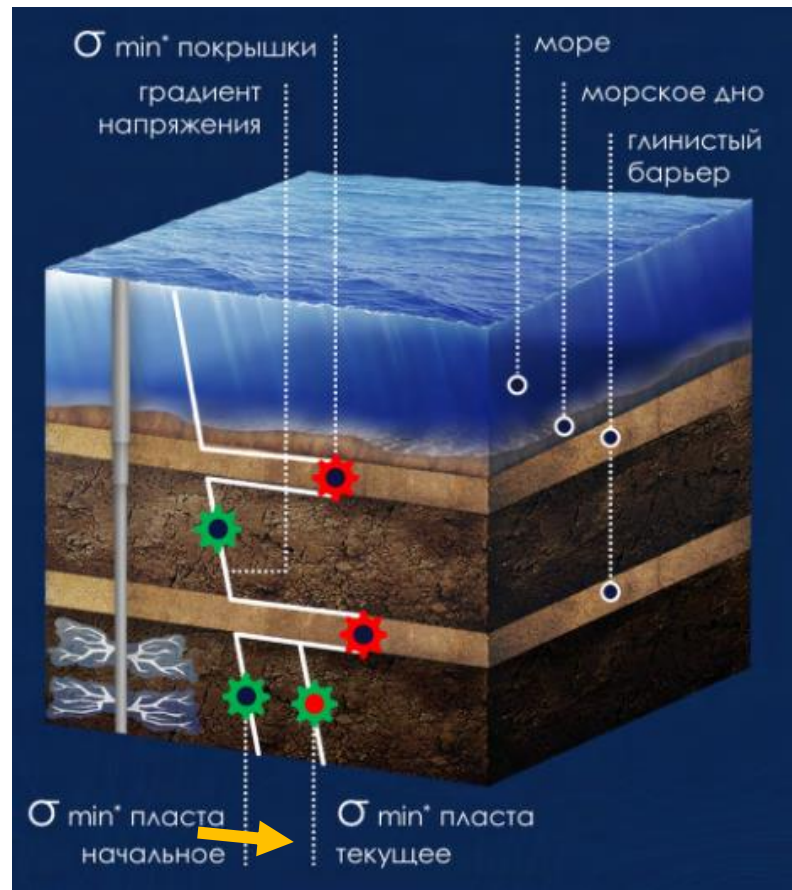


Рисунок 3.2 Схема постепенного увеличения напряжения в целевом пласте-домине из-за наполнения.

Исходя из описанного процесса и представленной концептуальной схемы наполнения целевых пластов-доменов, в рамках высказанных допущений можно сформулировать понятия двух важных режимов работы скважины:

1. Технический (проектный) предел

Технический предел определяется прочностными свойствами пород и устанавливается на уровне давления распространения трещины во флюидоупоре (ДРТ_{флюидоупора}). Достижение этого предела позволяет трещине распространяться в пласте-флюидоупоре. Превышение этого предела приводит к неконтролируемым

закачкам и прорыву трещин через флюидоупор и требует немедленной остановки закачки и перехода на другой домен.

2. Операционный (эксплуатационный) предел

Операционный предел устанавливается на уровне давления закрытия трещины во флюидоупоре ($DZT_{\text{флюидоупора}}$). Достижение этого предела указывает на заполнение зоны размещения отходов, роста напряжения в пласте-домене до уровня напряжений в пласте-флюидоупоре и требует либо остановки скважины для длительной диссипации давления и снижения напряжения в пласте, либо перехода на другой интервал закачки.

Указанные пределы позволяют феноменологически разделить режимы работы скважины на окно нормальной работы (давление закачки ниже операционного предела), окно технического предела (давление закачки находится между техническим и операционным пределами) и зону неконтролируемой закачки (ее давление превышает технический предел). Необходимо проводить непрерывный мониторинг процесса роста трещины, так как закачка ведет к постепенному увеличению эффективного напряжения, действующего в пласте, и, как следствие, к изменению давлений раскрытия и закрытия трещины в домене. На качественном уровне указанная концепция может быть продемонстрирована с использованием рисунка 3.3.

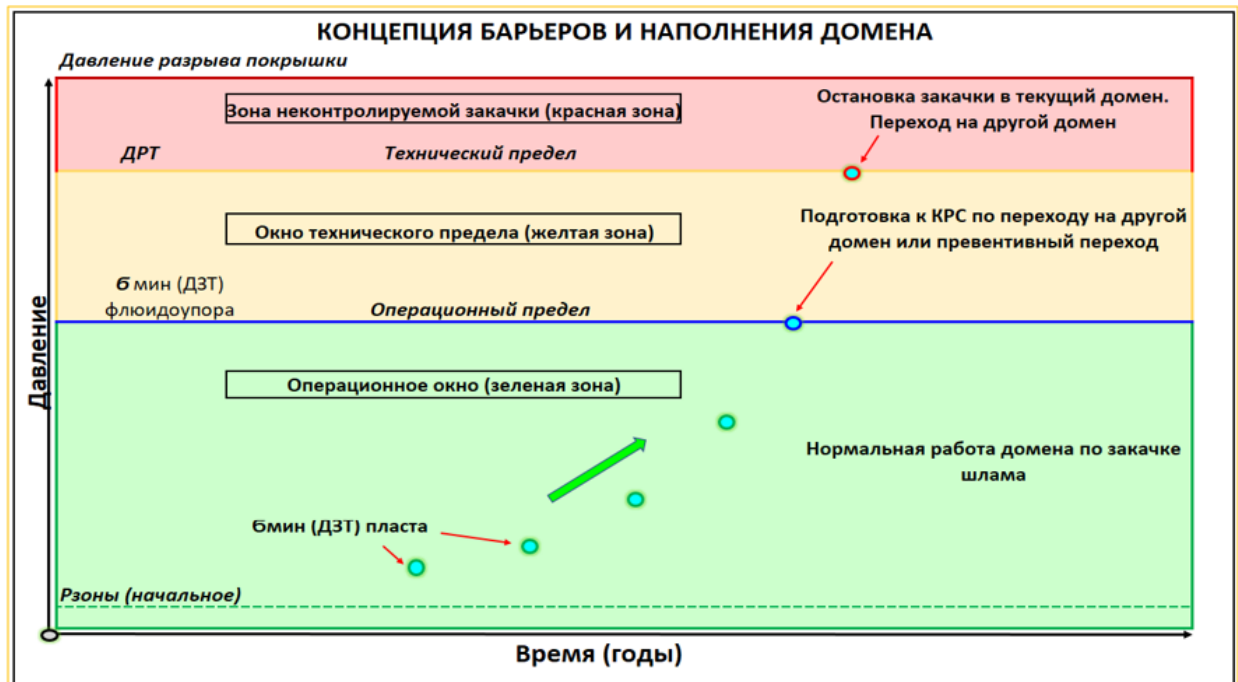


Рисунок 3.3 Визуализация технологических режимов и процесса наполнения домена (роста внутренних напряжений)

Предложенная концепция может быть следующим образом использована для выбора режима работы скважины и проведения сопутствующих мероприятий по мониторингу состояния скважины, пласта домена и пласта флюидоупора для снижения рисков прорыва.

На представленном рисунке 3.3 описаны различные зоны, показывающие состояние напряжения в пласте-домене по отношению к пласту-флюидоупору, операционному и техническим пределам. В зависимости от напряжения в пласте-домене описаны рекомендованные действия. При напряжении в пласте-домене в пределах операционного окна (зеленая зона) необходимо контролировать тренд давления закрытия трещины (ДЗТ пласта). При этом резкий нисходящий тренд может указывать на необходимость проведения геофизических исследований для подтверждения целевой закачки. При достижении напряжением в пласте-домене операционного предела (давления закрытия трещины во флюидоупоре) происходит выравнивание напряжений в пласте, при этом, если во флюидоупоре существуют естественная трещиноватость или если флюидоупор уже был порван, возможно открытие трещин(ы) во флюидоупоре, но не ее распространение через

весь флюидоупор. В таком случае рекомендуется остановка скважины для длительной диссипации давления или начало подготовки скважины к капитальному ремонту для перехода на другой домен. При достижении технического предела, когда напряжение в пласте-флюидоупоре достигает давления распространения трещины во флюидоупоре, происходит развитие и распространение трещины в нем. В таком случае необходимо рассмотреть вопрос срочной остановки закачки, постановки скважины на длительный простой для диссипации давления в целевом пласте и снижения напряжения или проведения капитального ремонта скважин для перехода на другой домен. Зона выше технического предела, называется зоной неконтролируемых закачек, где давление закрытия трещины превышает давление распространения трещины во флюидоупоре и это создает условия для неконтролируемого прорыва трещин через флюидоупор. В зону неконтролируемых закачек рекомендуется не заходить, так как при прорыве пласта-флюидоупора возможно возникновение рисков, связанных с закачкой вне лицензионных участков и прорывов следующих пластов и флюидоупоров вплоть до морского дна или дневной поверхности, без возможности перехода на вышележащие пласты-домены, соблюдая условия контроля пластов-флюидоупоров, так как пласты вышележащие пласты-флюидоупоры могут быть уже повреждены (порваны).

3.1.2 Выводы

Разработанная система мониторинга и контроля напряжений в пластах и флюидоупорах позволяет минимизировать риски, связанные с закачкой отходов бурения. Использование операционного и технического пределов обеспечивает безопасную эксплуатацию скважин и предотвращает прорыв трещин через флюидоупоры. Регулярный мониторинг давления закрытия трещины и анализ трендов позволяют своевременно принимать решения о корректировке режимов закачки и переходе на новые интервалы.

Контроль целостности покрышек флюидоупоров проводится с использованием программного обеспечения, которое позволяет визуально отслеживать текущее состояние и все отклонения от установленных пределов. После остановки закачки происходит дальнейший мониторинг давления в скважине. По тренду падения давления определяют давление закрытия трещины, которое показывает текущее напряжение в пласте. Если текущее давление закрытия трещины меньше установленных пределов, то закачка в дальнейшем продолжается в штатном режиме. Если же давление приближается к установленным пределам, то заранее планируются работы по капитальному ремонту скважины по переходу на вышележащий пласт, бурение бокового ствола или новой поглощающей скважины.

Для того, чтобы в полной мере использовать предложенную концепцию для снижения рисков прорыва пластов-флюидоупоров, была разработана упрощенная математическая модель описываемого процесса.

3.2 Постановка задачи и основные положения

Рассматривается закачка смеси измельченных отходов бурения и жидкости в целевой пласт, расположенный между двумя пластами, в которых величина минимального главного напряжения выше, чем в целевом пласте.

В целевой пласт-домен закачивается смесь отходов бурения и жидкости, рассматриваемая как упруго-вязко-пластическое тело с нелинейной реологией. Были проведены исследования на тему выбора реологической модели. Так, в работах [Shioya et al., 2002] рассматривалось течение суспензии, в работе [Shadizadeh et al., 2011] было предложено использование степенного закона для всей смеси. В работе [Mukherjee et al., 2017] было продемонстрировано, что использование степенного закона приводит к недооценке темпов изменения давления в околоскважинной зоне, а использование Бингамовской реологии напротив ведет к переоценке темпов. Более сложные модели также могут быть

использованы, однако количество неизвестных параметров оказывается слишком велико для анализа чувствительности [Hongmei et al., 2008]. Учитывая, что целью работы является снижение рисков с использованием достаточно упрощенной модели, предпочтительнее выбрать Бингамовскую жидкость. Используемая модель детально описана в работе [Guo et al., 2020], ниже цитируются ее основные уравнения (1–5) с сохранением оригинальных обозначений.

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ тела с Бингамовской реологией линейно связана с касательным напряжением τ , если касательное напряжение превышает пороговое значение – динамическое напряжение сдвига τ_0 :

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_0, \quad (3.1)$$

где η – вязкость при сдвиге. Для описания течения такой жидкости используется градиентный метод [Wu, Pruess, 1998]. Он позволяет записать уравнение движения рассматриваемой жидкости в виде:

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu_b} \nabla P_e, \quad (3.2)$$

где:

$$P_e = \begin{cases} \operatorname{sgn}(P)(|P| - G_h), & |P| \geq G_h, \\ 0, & |P| < G_h. \end{cases} \quad (3.3)$$

Здесь \mathbf{v} – вектор скорости фильтрации (м/с), k – абсолютная проницаемость (м^2), μ_b – пластическая вязкость Бингама (Па·с), P – давление (Па). G_h – минимальный потенциальный градиент (Па), определяющийся как:

$$G_h = \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k}}, \quad (3.4)$$

где α – экспериментально определяемый коэффициент. В работе [Guo et al., 2020] было предложено брать этот коэффициент равным $2.367 \cdot 10^{-4}$.

При нагнетании жидкости, удовлетворяющей уравнениям (3.1–3.4) в скважину, разрабатывающую бесконечный однородный горизонтальный пласт, поле давлений определяется как:

$$P(r,t) = P_i + [r - (r_w + \delta_f(t))] G_h - \frac{q(t) \mu_b}{2\pi k h} \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{1 + \frac{2\delta_f(t)}{r_w}}{\frac{2\delta_f(t)}{r_w}} \right] \ln \left[\frac{2r}{r_w + \delta_f(t)} - \left(\frac{r}{r_w + \delta_f(t)} \right)^2 \right], \quad (3.5)$$

где r – радиус-вектор рассматриваемой точки в полярной системе координат, центр которой совпадает с центром скважины (м); t – время (с); P_i – начальное давление в пласте (Па); r_w – радиус скважины (м); $\delta_f(t)$ – расстояние, пройденное фронтом нагнетаемой жидкости (м); $q(t)$ – расход флюида, задаваемый как начальное условие; h – мощность пласта (м); ρ_w – плотность флюида (кг/м³).

Изменение давления ведет к изменению компонент тензора эффективных в смысле Био напряжений, действующих в целевом пласте, в частности минимального главного напряжения σ_h :

$$\sigma_h(r,t) = S_h(r,0) - \alpha_B P(r,t), \quad (3.6)$$

где $S_h(r,0)$ – распределение полных минимальных главных напряжений в пласте, которые, как предполагается, не зависят от времени, α_B – коэффициент Био.

В рамках рассматриваемого подхода предполагается, что пласт-флюидоупор является непроницаемым, то есть изменение давления и, соответственно, эффективного минимального напряжения в нем пренебрежимо мало по сравнению с изменением состояния целевого пласта.

При закачке отходов бурения в целевой пласт необходимо создать трещину только в целевом пласте и не допустить ее прорыва в пласт-флюидоупор. На основе одномерной геомеханической модели можно определить значение давления, при котором произойдет прорыв трещины в вышележащий пласт: оно будет зависеть от минимального главного напряжения в пласте-флюидоупоре. В работе [Wasantha et al., 2018] на основании основных положений механики хрупкого разрушения [Simonson et al., 1976] было приведено следующее выражение для давления P_{crit} , с которым необходимо проводить закачку для того, чтобы трещина, развивающаяся в целевом пласте с минимальным напряжением $\sigma_h(t)$ (зависимость от времени определяется выражением (3.6) с использованием $r = r_w$ при распространении

трещины от стенки скважины), смогла перейти в выше- и нижележащие пласты-флюидоупоры с неизменным минимальным главным напряжением σ_{hf} :

$$P_{crit} - P(r = r_w, t) = \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi h}} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} - 1 \right) + \frac{2(\sigma_{hf} - \sigma_h(t))}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right), \quad (3.7)$$

где K_{1c} – трещиностойкость пласта-флюидоупора, $\varepsilon = l/h$ (l – половина высоты трещины). На рисунке 3.4 схематично представлена система целевого пласта и двух флюидоупоров, для которой справедливо выражение (3.7). Если прорыв в пласты-флюидоупоры не происходит, в рамках данной работы ε полагается равным единице.

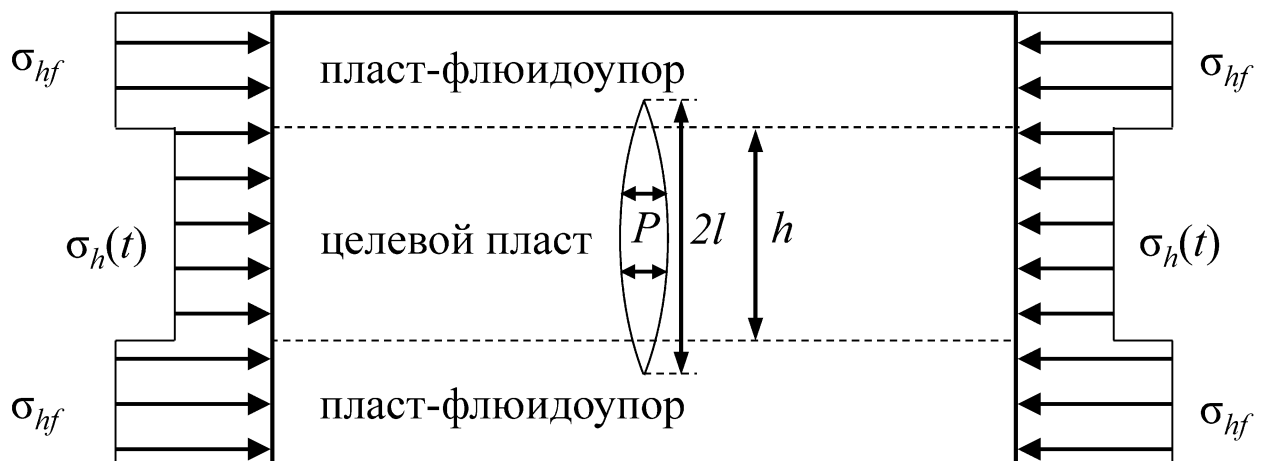


Рисунок 3.4 Поле напряжений, в котором развивается трещина.

Выражение (3.7), строго говоря, справедливо только в случае, при котором выше- и нижележащий пласты идентичны. Тем не менее изменения расчетного давления при корректном учете нижнего пласта-флюидоупора для оценки прорыва трещины в верхний пласт приведут к усложнению модели: будет необходимо рассчитывать коэффициенты интенсивности напряжений на кончиках трещины, что приведет к замедлению алгоритма. В работе была выбрана более упрощенная модель, так как для снижения экологических рисков необходимо рассчитывать в первую очередь именно риск прорыва в вышележащий пласт-флюидоупор, что может привести к попаданию осадков в грунтовые воды и дальнейшей миграции в морские воды. Кроме того, в работе [Wasantha et al., 2018] указывается, что, несмотря на то, что входящая в выражение (3.7) величина давления, не будет равна

давлению из выражения (3.5), его использование в достаточной степени согласуется с результатами полноценного численного решения связанной задачи роста трещины и фильтрации.

В выражение (3.7) входит минимальное главное напряжение в целевом пласте, которое, как видно из выражений (3.5) и (3.6), зависит от времени, причем при циклической закачке оно увеличивается, следовательно, критическое значение давления прорыва уменьшается. При том, что для успешной закачки необходимо, чтобы давление закачки превышало минимальное главное напряжение в целевом пласте. При увеличении напряжения в пласте-домене, разница между напряжениями в пласте-домене и пласте-флюидоупоре сокращается по мере проведения повторных циклов. В определенный момент давление, при котором закачка возможна, оказывается больше, чем критическое давление, определяемое выражением (3.7): в этом случае закачка отходов бурения в целевой пласт неизбежно приведет к прорыву в вышележащий пласт-флюидоупор, чего следует избегать. Этим и обуславливается необходимость контроля целевого пласта: важно иметь возможность прогноза того, после какого количества циклов закачки прорыв в вышележащий пласт-флюидоупор станет неизбежным и будет необходимо перейти на другой целевой пласт. Также интересно отметить, что возможно рассмотрение консервации целевого пласта, близкого к критической точке, на некоторое время, по прошествии которого закачанная смесь перераспределится в нем, и поле давлений выровняется. Однако, рассмотрение такой возможности находится вне рамок данного исследования.

3.3 Подготовка исходных данных для моделирования

Данные фактических замеров расхода (сплошная линия) и давления (пунктирная линия) смеси, закачиваемой в пласт, полученные с одной из скважин, подготовленных для закачки шлама на проекте «Сахалин-2», рассчитанные для заданного временного интервала приведены на рисунке 3.5. Точками отмечены

предполагаемые моменты закрытия трещины и соответствующие оценки минимального главного напряжения в целевом пласте.

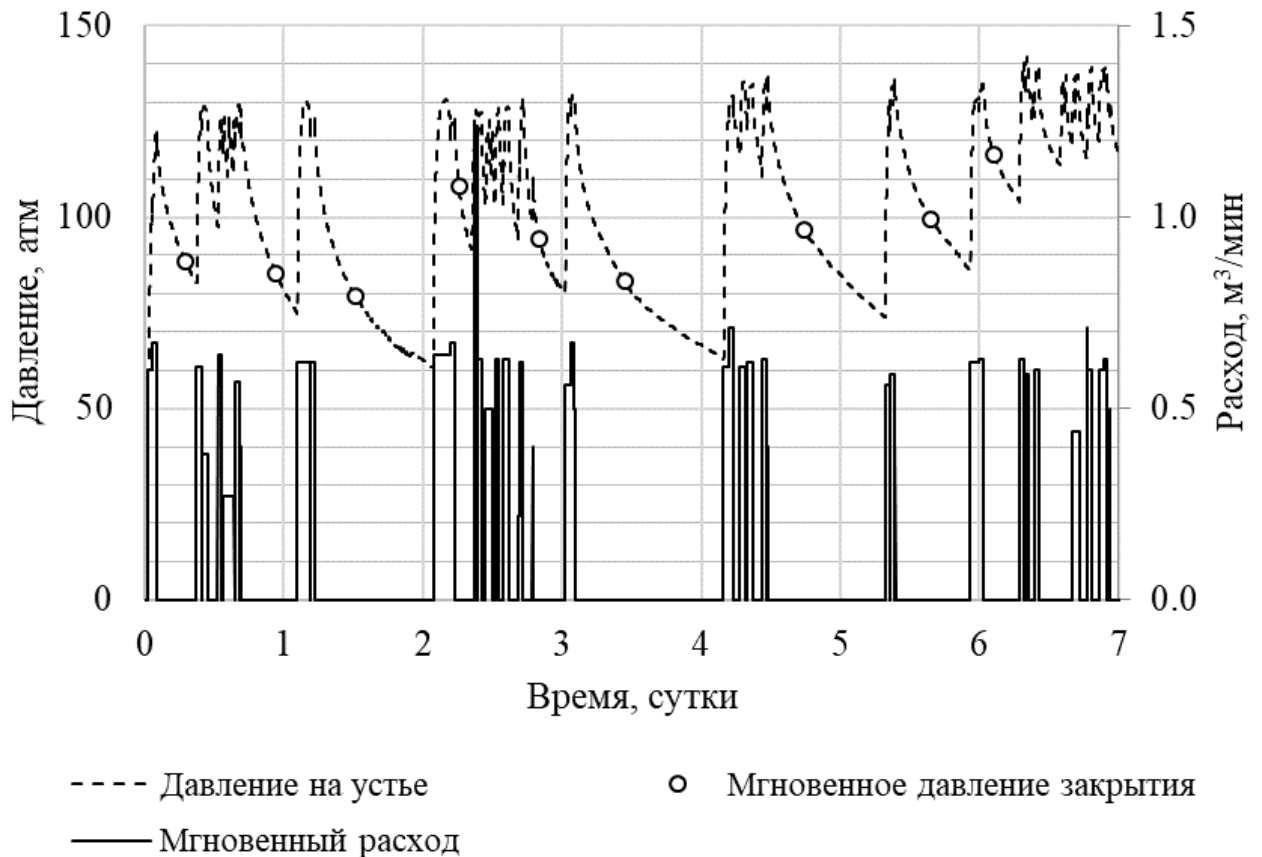


Рисунок 3.5 Фактические данные циклической закачки.

Видно, что в соответствии с выражениями (3.5) и (3.6) действительно наблюдается повышение давления закрытия трещины с каждым следующим циклом, причем изменения нелинейные. Это связано с тем, что на каждом следующем цикле остается значимой вся история изменения давления в скважине и соответствующая функция закачки $q(t)$.

Расчет давления закрытия трещины и текущего минимального главного напряжения может быть осуществлен в ходе анализа кривой изменения давления после остановки закачки. Согласно методологии, предложенной в работе [Gaarenstroom et al., 1993], после остановки закачки могут быть отмечены мгновенное давление закрытия и минимальное главное напряжение (эффективное). Для такого анализа используется алгоритм, основанный на так называемой G -функции [Gulrajani, Nolte, 2000]

В качестве входных данных используются: зависимость забойного давления от времени, а также зависимость расхода закачиваемой жидкости разрыва в пласт от времени. Метод G -функции применяется для анализа данных давления, соответствующих временному промежутку после остановки закачки жидкости в пласт. Данный момент определяется при помощи кривой зависимости расхода закачиваемой жидкости разрыва в пласт от времени.

Подробнее метод определения давления закрытия трещины по данным об изменении давления описан в работах [Nordgren, 1972] и [Nolte, 1979]. Основой этого метода является сопоставление поведения давления, первой производной давления, полулогарифмической производной давления в зависимости от так называемой G -функции [Barree, 1998; Barree et al., 2007].

Зависимость давления от G -функции выводится из уравнения непрерывности, записанного для жидкости, закачиваемой в скважину и распространяющейся в трещине и в пласте:

$$-\frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} = \lambda(z,t) + \frac{\partial A(z,t)}{\partial t}, \quad (3.8)$$

где:

$$\lambda = \frac{2CH_p}{\sqrt{t - \tau(z)}}, \quad A = \int_{-h/2}^{h/2} w dz = \frac{\pi H^2}{2E'} p, \quad (3.9)$$

Q – расход жидкости; Z – координата на оси, параллельной оси скважины; λ – потери жидкости на единицу длины трещины; A – площадь поперечного сечения трещины; C – коэффициент потери жидкости; H_p – высота трещины, где начинаются утечки в пласт; τ' – время появления трещины в точке z ; H – высота трещины; $E' = E/(1 - \nu^2)$, где E – модуль Юнга и ν – коэффициент Пуассона.

В результате ряда преобразований, подробно описанных в работе [Nolte, 1979], выражения (8) и (9) могут быть сведены к следующему выражению, необходимому для определения давления закрытия трещины гидроразрыва:

$$P(\delta) = P(\delta_0) - \frac{CH_p E' \sqrt{t_0}}{H^2 \beta_s} G(\delta_0, \delta), \quad (3.10)$$

где:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t-t_0}{t_0}, \quad G(\delta_0, \delta) = \frac{16}{3\pi} \left[(1+\delta)^{3/2} - \delta^{3/2} - (1+\delta_0)^{3/2} + \delta_0^{3/2} \right], \quad (3.11)$$

t_0 – время, прошедшее от прекращения закачки до момента закрытия трещины, β_s – отношение среднего давления закачки к усредненному давлению жидкости в трещине в момент остановки закачки. Согласно методу G -функции, момент закрытия трещины определяется по характерному совокупному поведению трех кривых: кривой давления, кривой первой производной давления по G -функции $\partial P(\delta)/\partial G$ и полулогарифмической производной давления по G -функции $\partial P(\delta)/\partial(\ln G) = G \partial P(\delta)/\partial G$. Пример определения давления закрытия продемонстрирован на рисунке 3.6.

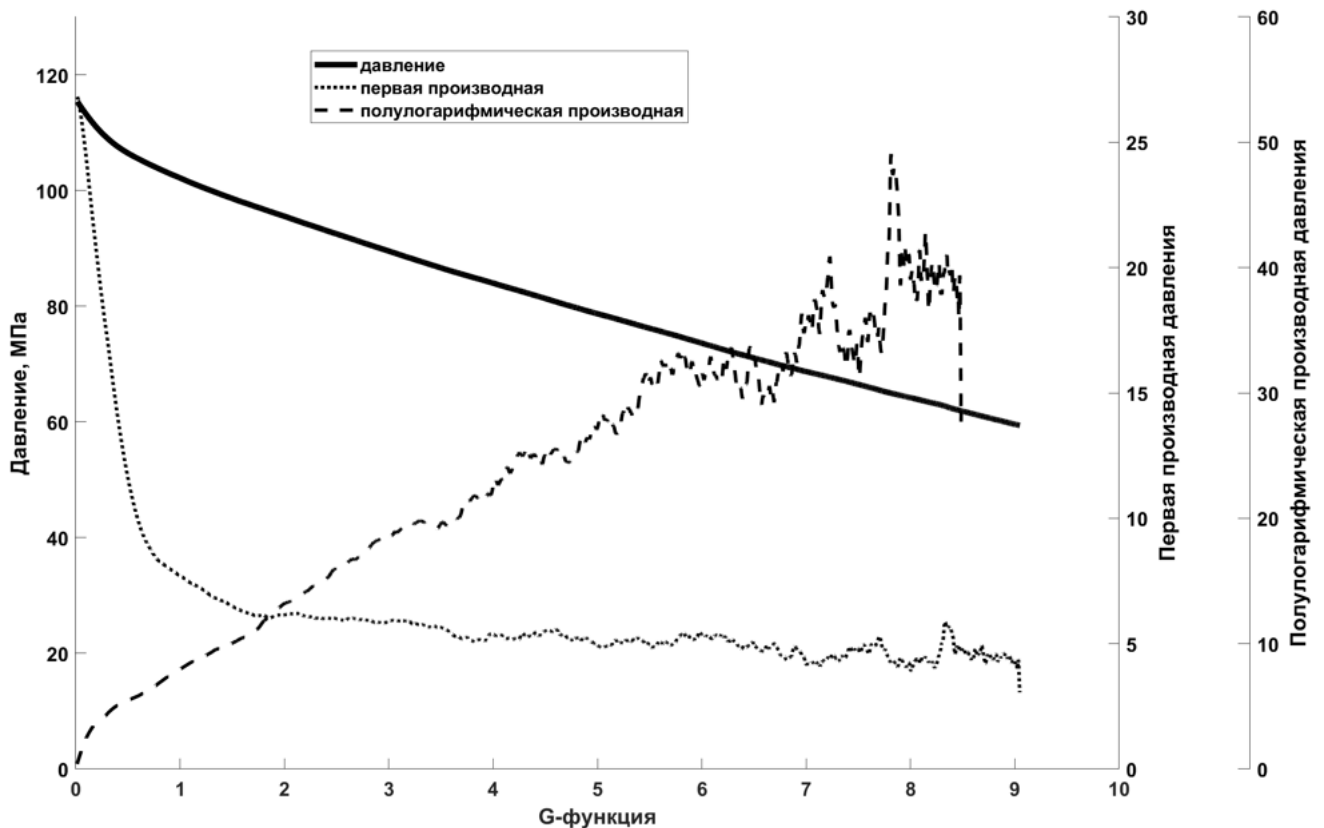


Рисунок 3.6 Пример совокупного поведения кривой давления, кривой первой производной давления по G -функции и полулогарифмической производной давления по G -функции.

Так как данный метод применяется к данным, получаемым в период времени после остановки закачки жидкости разрыва в пласт, используется предположение

о том, что утечки жидкости в пласт происходят с постоянной скоростью. В таком случае полулогарифмическая производная до момента времени, когда трещина закрывается, должна вести себя, как прямая линия, проходящая через центр координат [Castillo, 1987]. Соответственно, момент закрытия трещины определяется по отклонению полулогарифмической производной давления от прямой линии, проходящей через начало координат. Корректность найденной величины времени проверяется тем, что в это же время первая производная давления должна иметь горизонтальный участок (что соответствует нулевому значению второй производной от давления по G -функции и может выглядеть как локальный экстремум или точка перегиба кривой зависимости первой производной от давления по G -функции). Отклонение от предположения о постоянстве утечек в пласт и сохранении площади бортов трещины в процессе ее смыкания (которые положены в основу метода G -функции) приводят к отклонению полулогарифмической производной вверх или вниз от прямой соответственно.

Таким образом, можно сформулировать общую задачу контроля состояния целевого пласта при циклической закачке отходов бурения. По данным об объемах закачанной в целевой пласт смеси и ее реологическим свойствам необходимо иметь возможность рассчитать изменения давления насыщающего породу флюида в призабойной зоне пласта. Такой расчет осуществляется с использованием выражения (3.5). Далее по формуле (3.6) определяется изменение минимального главного напряжения в целевом пласте. Модель уточняется с каждой следующей закачкой, поскольку использование подхода, основанного на применении G -функции, позволяет определять значение минимального главного напряжения после каждой остановки закачки. Критерием работоспособности модели является корректное воспроизведение изменения минимального напряжения в целевом пласте, согласующееся с фактическими замерами давления закрытия трещины. Выражение (3.7) используется по данным верифицированной модели для расчета давления прорыва трещины в вышележащий пласт-флюидоупор как функции времени. Далее выполняется прогнозный расчет: рассматривается изменение этого

давления при последующих циклах закачки, рассчитывается количество циклов закачки, остающееся до критического момента приближения давления прорыва к минимальному главному напряжению в целевом пласте. Исходя из этого формулируются рекомендации для дальнейшей работы с целевым пластом или переходу на другой целевой пласт.

3.4 Результаты моделирования

Данные, снятые в ходе проведения циклической закачки отходов бурения на одной из специально подготовленных для захоронения отходов скважин, расположенной на северо-восточной акватории острова Сахалин проекта «Сахалин-2», были приведены на рисунке 3.5. В данном случае целевой пласт был выбран таким образом, чтобы контраст напряжений между ним и вышележащим непроницаемым пластом был достаточно велик. На рисунке 3.7 представлен профиль минимального главного напряжения, рассчитанного на основании пороупругой модели [Prats, 1981]. Пунктирной линией выделена граница раздела между целевым пластом и вышележащим пластом-флюидоупором. Видно, что на этой линии наблюдается резкое изменение минимального напряжения в среде, что обеспечивает низкие риски прорыва отходов бурения в пласт-флюидоупор.

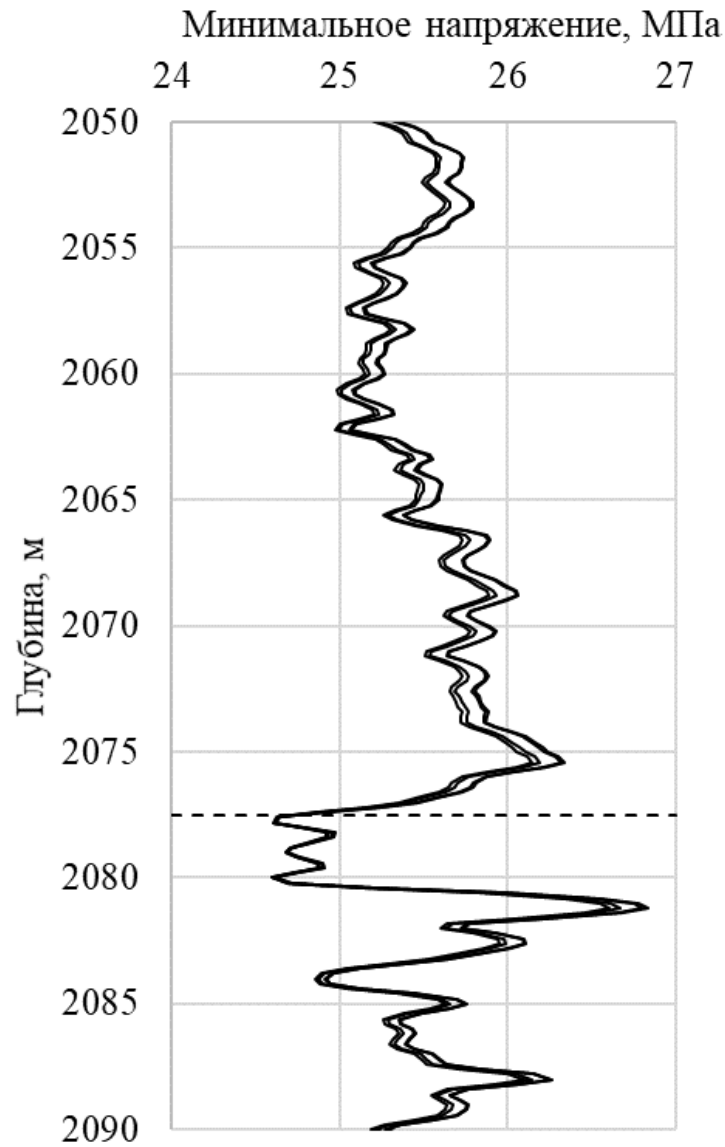


Рисунок 3.7 Одномерная модель в области целевого пласта.

При расчете минимального напряжения σ_h была использована известная система уравнений пороупругости [Prats, 1981]:

$$\sigma_v(z) = \int_0^z \rho(\zeta) g d\zeta - \alpha_B(z) P_{por}(z),$$

$$\sigma_h(z) = \min \left(\sigma_v(z); \quad \sigma_v(z) \frac{\nu(z)}{1-\nu(z)} + [\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z)] \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2} \right) \quad (3.12)$$

где ρ – плотность породы, g – ускорение свободного падения, α_B – коэффициент Био, P_{por} – поровое давление, ν – статический коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга. ε_h и ε_H – горизонтальные деформации среды, определяемые действием

тектонических сил, z – рассматриваемая глубина. В данной работе значения этих деформаций определялись на основании оценки минимального горизонтального напряжения по данным мини-ГРП и расширенных тестов на утечки. Расчет остальных параметров, входящих в выражения (3.12), осуществлялся по результатам комплексирования данных лабораторных экспериментов, в рамках которых определялись статические и динамические упругие модули, и результатов интерпретации геофизических исследований скважин. Несколько кривых, показанных на рис. 3.7, соответствуют расчетам минимального главного напряжения по данным о механических свойствах и тектонических деформациях из области неопределенности, возникающей при построении модели, и характеризуют общую погрешность в определении минимального напряжения. Видно, что характерное значения барьера напряжений – разницы между минимальным главным напряжением в целевом пласте и пласте-флюидоупоре – составляет первые единицы МПа. Важно отметить, что результаты оценки горизонтальных деформаций продемонстрировали, что минимальное главное напряжение остается меньше вертикального, что соответствует сбросовому или сдвиговому тектоническому режиму, соответственно, рост трещины происходит в вертикальной плоскости, обеспечивая принципиальную применимость модели, изображенной на рисунке 3.4.

Осредненные свойства целевого пласта были использованы в выражении (3.5) для расчета изменения давления в породах околоскважинной зоны. Поскольку предварительно не проводились испытания реологических свойств закачиваемой в целевой пласт смеси, реологические параметры α и τ_0 было необходимо подобрать таким образом, чтобы наблюдать наилучшее соответствие между фактическими данными и предсказаниями модели. Для этого использовалось выражение (3.6), позволяющее определить минимальное горизонтальное напряжение в любой момент времени при известной динамике закачки, а также выражения (3.10-3.11).

Результаты применения предложенной модели с использованием фактических данных о напряженно-деформированном состоянии пластов, их

упруго-прочностных свойствах, а также динамики наблюдаемой закачки приведены на рисунке 3.8. Пунктирной линией изображена зависимость минимального горизонтального напряжения от времени, точками – результаты оценок после применения G -функции для каждой остановки закачки. Хотя формально в выражениях, описывающих реологию закачиваемой смеси присутствуют два параметра – α и τ_0 – в выражении (3.5), использовавшемся для расчета давления флюида для выражения (3.6), присутствует минимальный потенциальный градиент G_h , пропорциональный их произведению (3.4), поэтому фактически оптимизация проводится только по одному параметру. В ходе оптимизации методом наименьших квадратов определяется величина G , при которой минимальна разница между фактическими оценками минимального горизонтального напряжения в дискретные моменты времени и результатами непрерывного расчета по выражению (3.6) в соответствующие моменты. Следует отметить, что начальное (неизменное) значение полного минимального горизонтального напряжения $S_h(r,0)$ было взято в точке $r = r_w$ на основании одномерной геомеханической модели (рисунок 3.7), где было рассчитано эффективное горизонтальное напряжение, соответствующее начальному давлению в целевом пласте.

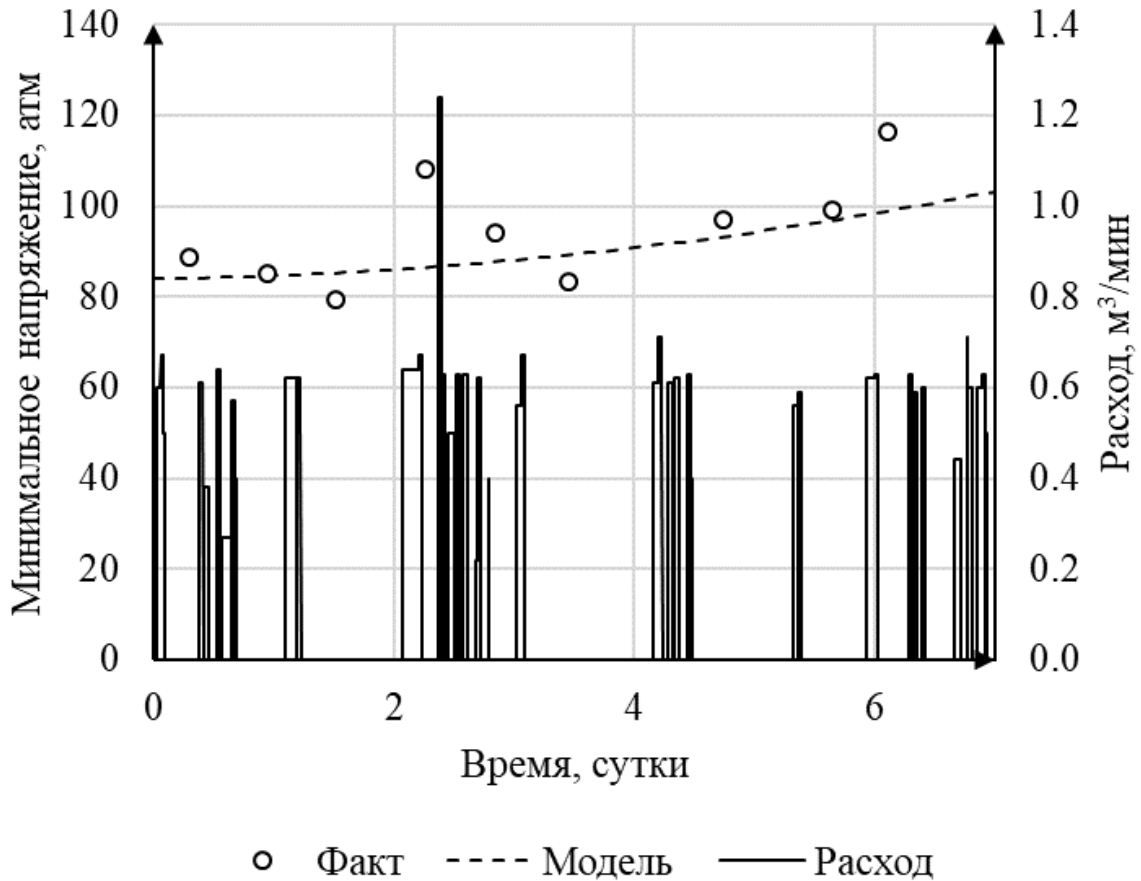


Рисунок 3.8 Расчетные и замеренные изменения минимального напряжения в целевом пласте.

Настроенная модель изменения минимального горизонтального напряжения в целевом пласте далее была использована для расчета соответствующего изменения давления прорыва трещины в вышележащий пласт-флюидоупор по уравнению (3.7). Для прогноза сделано предположение о том, что темпы закачки на последующих циклах и интервалы между циклами будут такими же, как и в предшествующих циклах. Результаты представлены на рисунке 3.9, где штрихованной черной линией показано расчетное изменение минимального горизонтального напряжения в целевом пласте по мере проведения следующих циклов закачки с сохранением их средних темпов. Пунктирная линия (минимальное главное напряжение в целевом пласте) и штрихпунктирная линия (минимальное главное напряжение в пласте-флюидоупоре) играют роль верхней и нижней границ допустимых значений давления закачки. В связи с этим важна точка

их пересечения, наступающая через 12 суток после начала анализа. Этот момент будет соответствовать невозможности дальнейшей закачки отходов с теми же расходами. В связи с этим фактическая закачка была прекращена на некоторое время. За это время происходит перераспределение давления в целевом пласте, благодаря чему дальнейшие замеры давления свидетельствуют о том, что минимальное главное напряжение в целевом пласте становится меньше расчетного, показанного на рисунке пунктирной линией, и рассчитанного исходя из предположения о сохранении темпов закачки.

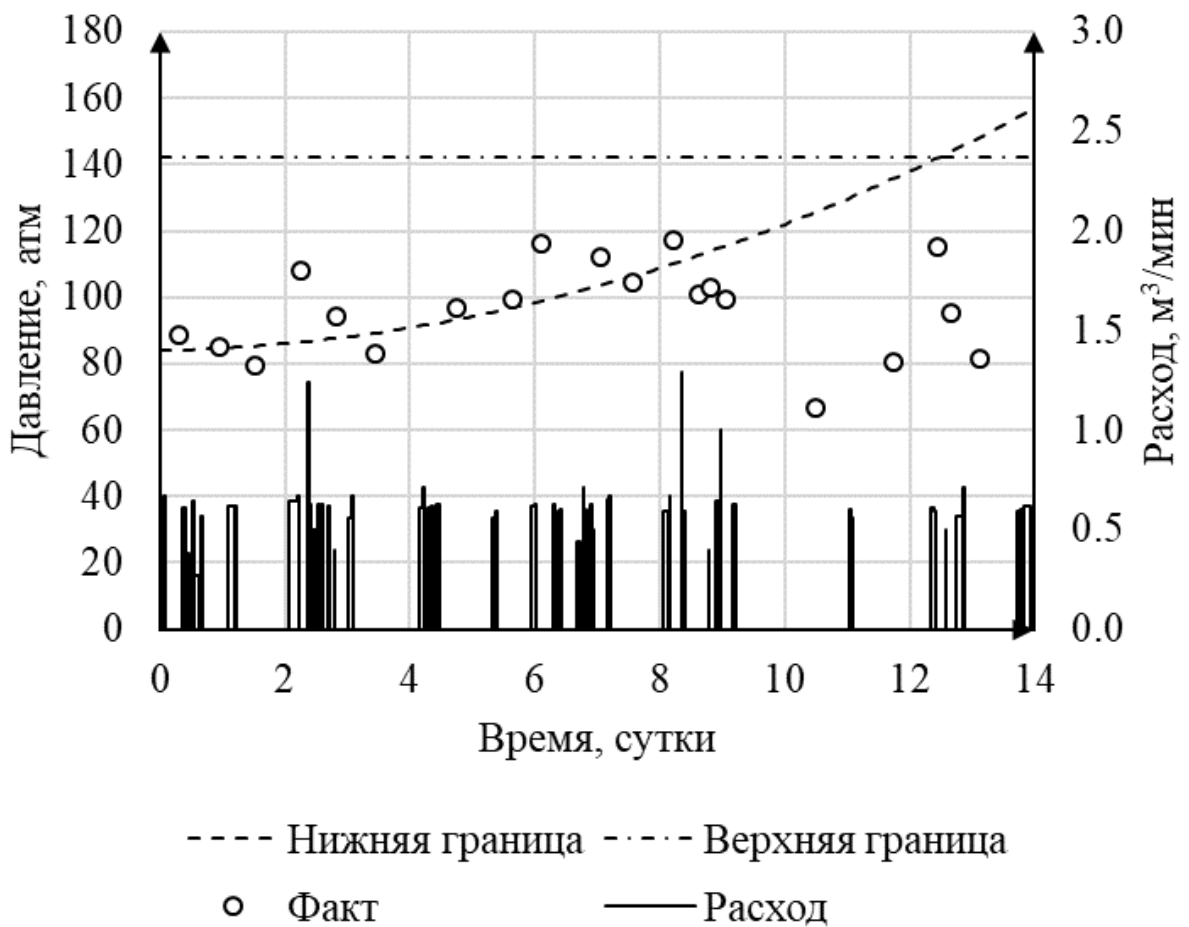


Рисунок 3.9 Расчетные и замеренные изменения минимального напряжения в целевом пласте с учетом расчетного предела.

Таким образом, предложенная методология контроля состояния целевого пласта для циклической закачки отходов бурения позволяет прогнозировать количество циклов закачки, которые еще допустимо проводить до того, как прорыв в вышележащий пласт-флюидоупор станет неизбежным.

3.5 Заключение по главе 3

Для предотвращения реализации рисков прорыва покрышки необходимо как можно более детально контролировать состояние целевых пластов и пластов-флюидоупоров. Это может быть сделано благодаря анализу кривых изменения давления после каждой из циклических закачек: за промежуток времени между циклами закачки необходимо определить ряд параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние пород околоскважинной зоны, и оценить на их основе вероятность прорыва в пласты-флюидоупоры на последующих циклах с тем, чтобы вовремя прекратить работы по закачке в пласт, близкий к критическому состоянию и перейти на другой целевой пласт.

Построение полной модели такого процесса сопряжено со значительным количеством трудностей: смесь переработанных отходов бурения с жидкостью характеризуется нелинейной упруго-вязко-пластической реологией, в ходе ее закачки в целевой пласт происходит развитие зоны трещиноватости со сложной геометрией, варьирующейся между циклами закачки. Хотя существующие способы численного моделирования такой связанной задачи потенциально позволяют ее решить, остается вопрос со временем расчета: как было указано выше, осуществление контроля состояния пласта должно проводиться практически в режиме реального времени и за несколько часов, проходящих между циклами закачки должен проходить весь цикл технических работ по получению, обработке и интерпретации фактических данных – замеров давления, построению численной модели, проведению ряда расчетов с учетом потенциальных неоднозначностей и формированию рекомендаций по дальнейшей эксплуатации выбранного целевого пласта. Хотя создание численной модели, способной учитывать все значимые эффекты за допустимое время расчета, можно отнести к перспективам продолжения исследования по тематике, предложенная в данной работе упрощенная аналитическая модель позволила контролировать состояние целевого пласта и может быть использована на практике для выдачи предварительных

рекомендаций по эксплуатации целевых пластов с учетом их механических и фильтрационно-емкостных свойств.

Ниже приведена формулировка защищаемого положения 3:

Концептуальная и математическая модель условий прорыва пласта-флюидоупора позволяет использовать данные мониторинга для прогноза наполнения домена и достижения операционных пределов закачки отходов бурения в пласт со снижением геологических и экологических рисков.

Глава 4. Практическое применение

Описанные в предыдущих главах методы и подходы к определению операционного и технических пределов для работы скважины по размещению отходов бурения и технологических жидкостей, а также к организации системы комплексного геофизического мониторинга были использованы для снижения геологических и экологических рисков на отдельных объектах. В данной главе представлены результаты этого использования с оценкой потенциального эффекта, а также результаты геофизического мониторинга, подтверждающие безопасную реализацию утилизации отходов бурения на морских месторождениях, разработка которых осложнена тяжелыми климатическими условиями.

4.1 Реализация концепции операционного и технического пределов с мониторингом давления

Как следует из предыдущей главы, важную роль в выборе значений технического и операционного пределов давления, играет геомеханическая модель. Критически важной оказывается задача определения профиля минимального горизонтального напряжения вдоль скважины и обнаружения зон контраста напряжений. Как указано в обзорных работах [Ljunggren et al., 2003; Дубиня, 2019], существуют различные методы использования скважинных данных для оценки значений главных напряжений, действующих в окрестности скважины.

Для детальной реконструкции профилей горизонтальных напряжений был пройден весь алгоритм построения одномерной геомеханической модели: комплексирование данных геофизических исследований скважин; проведение лабораторных экспериментов по определению упруго-прочностных свойств; построение корреляционных связей между статическими и динамическими упругими модулями; оценка коэффициента Био и реконструкция профиля пластового давления с выделением зон его аномально повышенного значения;

привлечение данных о вывалообразовании и поведении наведенных трещин для оценки соотношения между минимальным горизонтальным и вертикальным напряжениями. Как и ранее, в выражении (3.12), использовалась пороупругая модель реконструкции профиля минимального горизонтального напряжения с ограничением по деформациям.

В данном разделе продемонстрирован пример применения разработанной программы выбора целевых пластов и мониторинга состояния пластов-флюидоупоров на примере двух скважин, при разработке морских нефтегазовых месторождений. На этих скважинах был применен слегка отличающийся подход в выборе пласта-домена под закачку. В скважине С-20 применен подход схожий с [Nadeem, Dusseault, 2007], где при выборе пласта под закачку предполагается наличие переслаиваний песка и сланца (несколько слоев). Ввиду геологических особенностей закачка осуществляется в терригенные породы нутовской свиты миоценового возраста, характеризующиеся сложной неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств. Для пород характерна сложная морфология пустотного пространства, включающая микро- и мезопористость, связанную с глинистыми минералами и обломками вулканических пород, а также частичным выщелачиванием плагиоклазов и калиевых полевых шпатов. Породы классифицируются как аркозовые и лититовые арениты, рисунок 4.1 далее. В скважине С-18 был применен другой подход при выборе пласта-домена. Как и в статье [Guo et al., 2007] для скважины С-18 был выбран глинистый барьер напряжений, покрывающий зону аргиллитов и разгрузочного песчаника с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами. Каротажный планшет с флюидоупорами и интервалам преимущественного размещения показан на рисунке 4.1 далее по тексту.

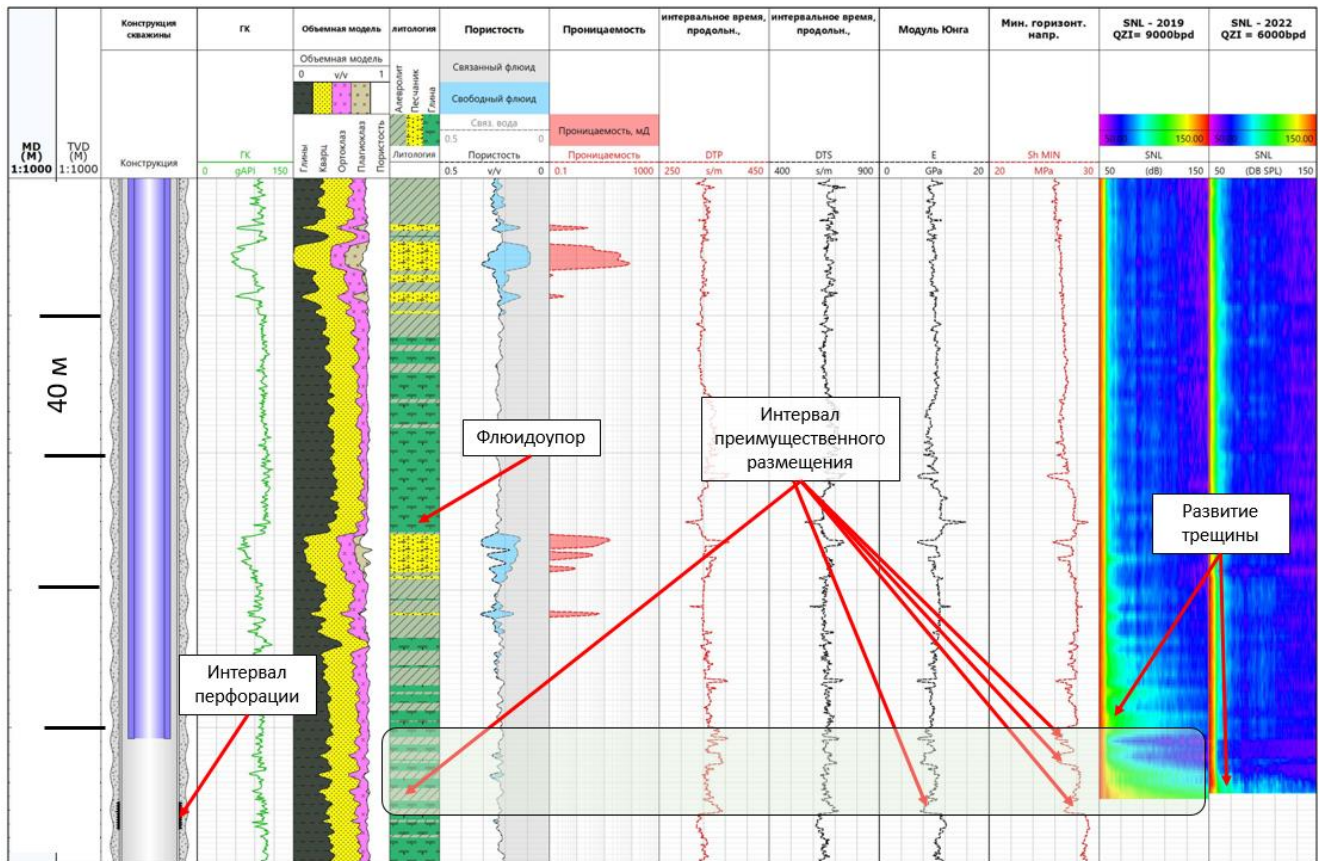


Рисунок 4.1. Скважина С-20. Сводный петрофизический и геомеханический планшет.

На рисунке 4.1 представлены геомеханическая модель, литологическая колонка, данные по проницаемости, пористости, а также результаты спектральной шумомерии за 2019 и 2022 годы. Особое внимание привлекают дебиты закачек и вертикальное распространение трещин. При закачке с дебитом 9000 баррелей в сутки (около 1400 м³/сутки), что соответствует типичным значениям при закачке шламовых пульп во время интенсивного бурения, трещина распространяется вертикально на 80 метров выше зоны закачки. Это свидетельствует о недостаточной поглощающей способности выбранного домена, его быстрой насыщаемости по давлению и преодолении трещиной локальных барьеров. Данные процессы наглядно отражены на графиках давлений при закачках (рисунки 4.2 и 4.3), где флуктуации точек давлений закрытия трещины и резкий нисходящий тренд указывают на увеличение проницаемости и снижение напряжения в пласте,

что характерно при прорыве локальных флюидоупоров и росте трещины в менее напряженные, как правило вышележащие зоны.

После геофизических исследований 2019 года был зафиксирован значительный вертикальный рост трещины при дебите 9000 баррелей в сутки, а на графиках давлений закрытия трещины отмечено приближение к операционным пределам. На основании этих данных суточный дебит закачки снизили до 6000 баррелей в сутки (порядка 950 м³/сутки), что позволило пласту дольше находиться в стадии покоя между циклами закачек и снижать внутреннее напряжение за счет диссипации давления. Повторные исследования 2022 года (спектральная шумометрия [Moiseenkov et al., 2021, Al Isae et al., 2022, Smirnov et al., 2022]) подтвердили ограниченное вертикальное распространение трещины, однако на графиках давлений (рисунки 4.2 и 4.3) при интенсификации закачек во время буровой кампании был достигнут операционный предел. В связи с этим было принято решение о капитальном ремонте скважины и переходе на вышележащий домен, выбрав для этого более проницаемый песчаный пласт. На графиках 4.2 и 4.3 видно снижение давлений закрытия трещин и улучшение приемистости скважины, что позволило эффективно эксплуатировать данную скважину в ходе буровой кампании 2023-2024 годов.

По итогу проведенного анализа можно заключить, что для выбора домена предпочтительны проницаемые пласты с непроницаемыми флюидоупорами, обладающими улучшенными механическими характеристиками (повышенным градиентом минимального напряжения). Однако даже при неоптимальном выборе поглощающих пластов, при наличии контраста напряжений между пластом и флюидоупором, предложенный в диссертации метод контроля наполнения и подтверждения целостности флюидоупора остается применимым. Оценка геомеханических свойств, литологии, фильтрационно-емкостных характеристик пород, а также определение технических и операционных пределов позволяют с достаточной уверенностью управлять поглощающими скважинами, обеспечивая безопасность процессов закачки и прогнозируя наполнение доменов.

На основании предложенной концепции определения операционных и технологических пределов был разработан электронный модуль в ПО «eWellBook», который отображает давление закрытия трещин после закачек и устанавливает операционные и технические пределы. Сравнение давления закрытия трещин с заданными пределами позволяет подтвердить свободный объем домена и построить графический прогноз его наполнения. На примере скважины С-20 (рисунок 4.2) видно, что в 2022 году при закачке около 90 тыс. м³ шламовой пульпы с содержанием до 40% твердых отходов во время буровой кампании боковых стволов был достигнут операционный предел. Это потребовало срочной подготовки к капитальному ремонту скважины для перевода закачки на вышележащий пласт-домен. При достижении операционного предела приемистость скважины значительно снизилась, что затрудняло закачку даже небольших объемов жидкости. Закачка была остановлена для проведения ремонтных работ. В начале 2023 года выполнен капитальный ремонт скважины, в результате которого закачка была переведена на вышележащий горизонт. Давления закрытия трещин снизились до уровней ниже, чем в первоначальном домене, что объясняется меньшими напряжениями в вышележащем пласте. 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. Также важно отметить что закачка в скважину С-20, в один домен велась на протяжении 8 лет и только в 2023 году домен переполнился.

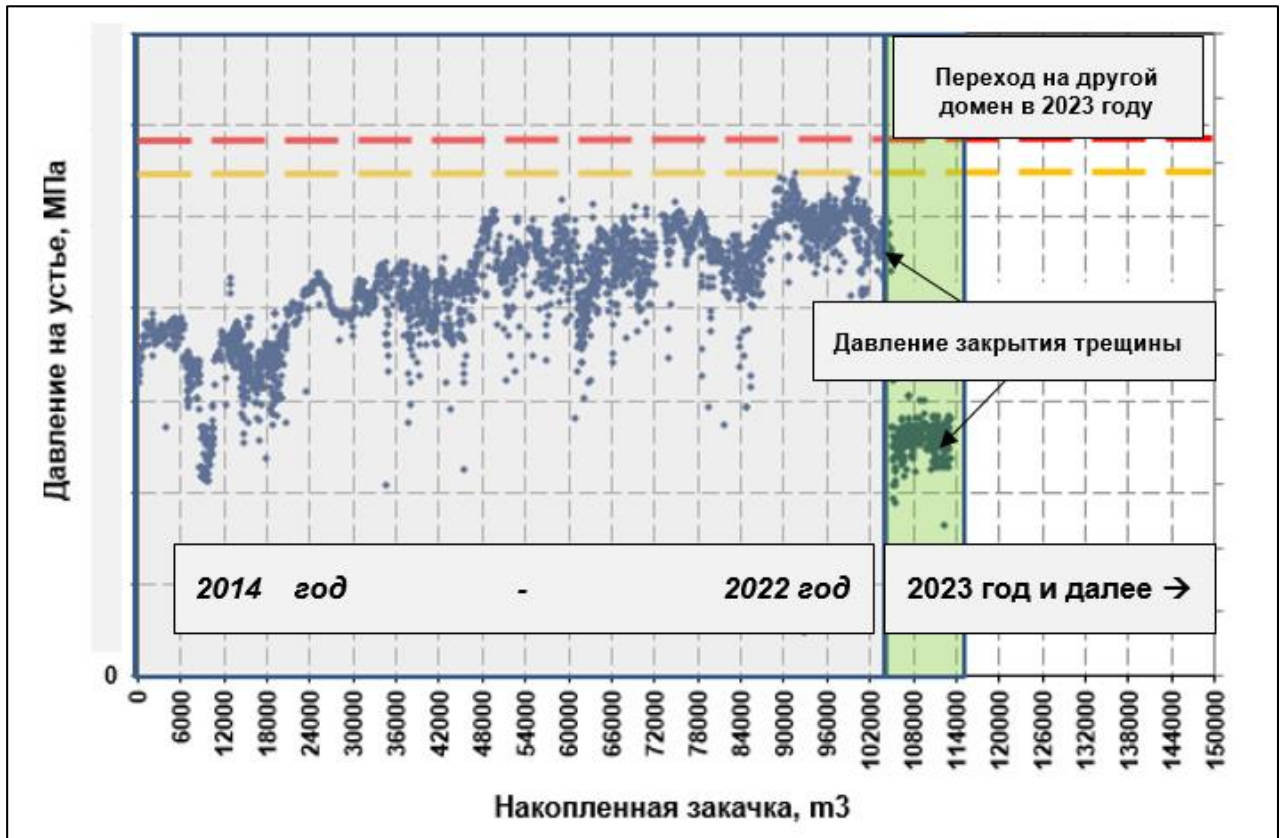


Рисунок 4.2 График зависимости давлений закрытия трещины от накопленной закачки пульпы и переход на другой домен, на примере скважины С-20, Пильтунского участка Пильтун-Астохского месторождения.

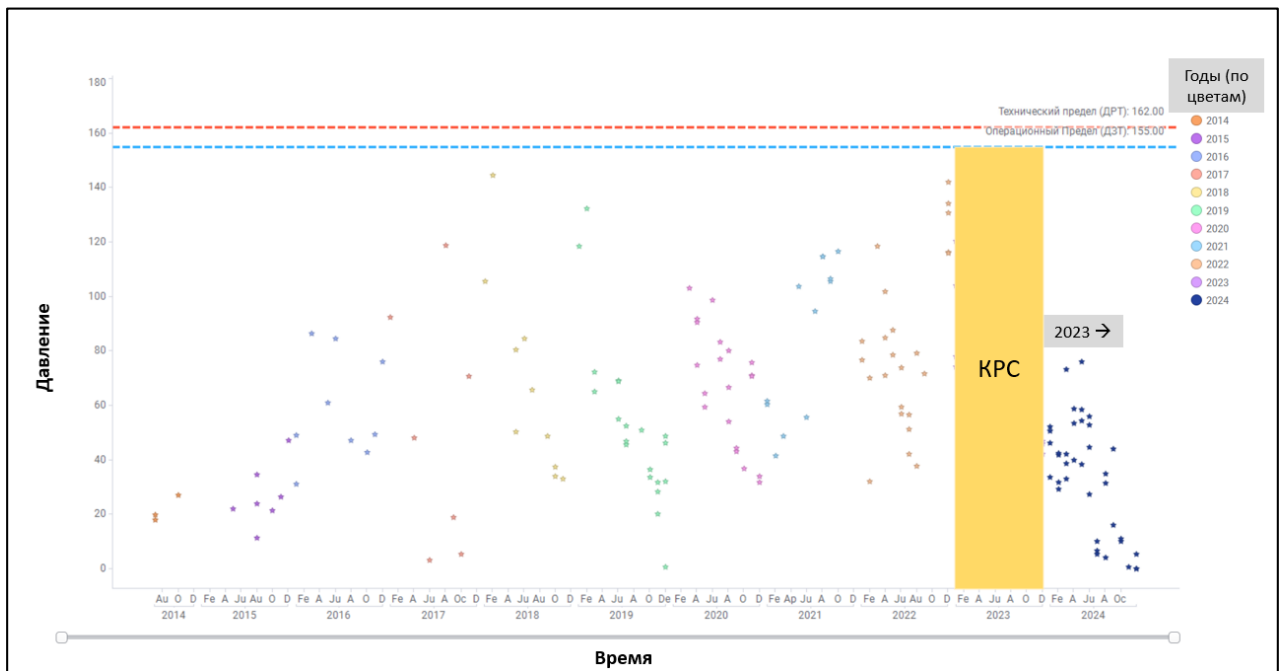


Рисунок 4.3 График зависимости давлений закрытия трещины от времени и переход на другой домен, на примере скважины С-20, Пильтунского участка Пильтун-Астохского месторождения. Из ПО «eWellBook».

На скважине С-18 был применен иной подход к выбору поглощающего домена. Так же, как и статье [Guo et al., 2007] для этой скважины был выбран глинистый барьер напряжений, покрывающий зону аргиллитов и разгрузочного песчаника с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами (рисунок 4.4). 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 привело к окончательному наполнению домена к началу 2020 года, однако прорыва флюидоупора не произошло, что подтверждено результатами комплекса ГИС, включающего спектральную шумометрию [Moiseenkov et al., 2021, Al Isae et al., 2022, Smirnov et al., 2022]. Давление закрытия трещины достигло операционного предела, и скважина была остановлена для капитального ремонта, который не мог быть выполнен немедленно из-за долгосрочной программы модернизации платформы Моликпак. После обновления платформы первой для ремонта была выбрана скважина С-18, чтобы обеспечить нормальную работу добывающей платформы и возобновить бурение боковых стволов. После ремонта скважины С-18 и перехода на вышележащий поглощающий домен была развернута кампания бурения боковых стволов в обводнившихся скважинах.

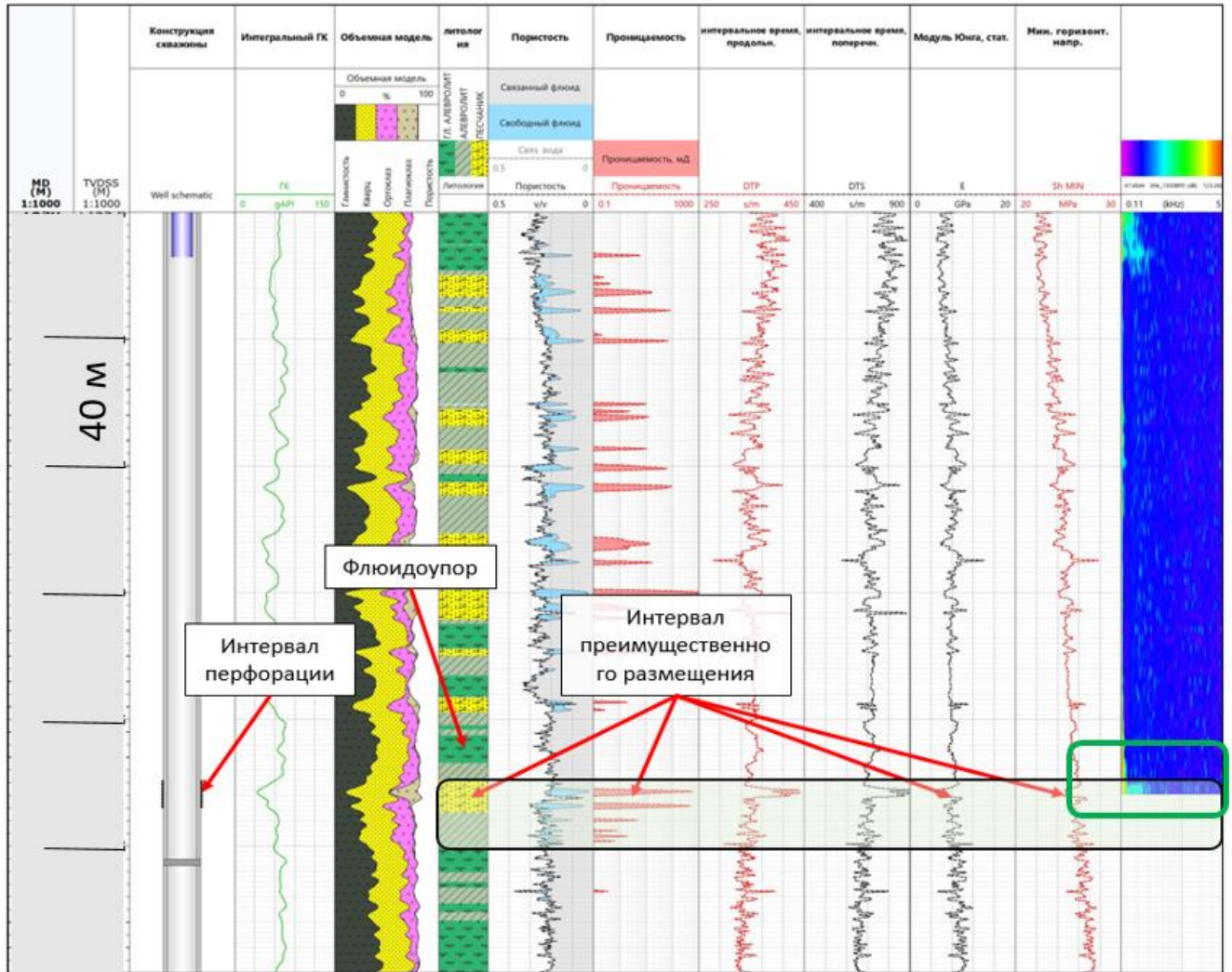


Рисунок 4.4 Скважина С-18. Сводный петрофизический и геомеханический планшет.

Обращает на себя внимание более плавный тренд давлений закрытия трещины (рисунок 4.5), что свидетельствует об отсутствии резких прорывов через локальные незначительные барьеры и более равномерном, предсказуемом заполнении выбранного домена. Такое поведение подтверждает преимущество концепции выбора проницаемых доменов для диссипации давления и размещения твердых частиц из закачиваемой пульпы, при присутствии жестких покрывающих непроницаемых флюидоупоров. На рисунке 4.5 также четко виден тренд роста давления вплоть до установленных операционных пределов. При достижении этих пределов, чтобы избежать прорыва флюидоупора, необходимо переходить на

«свежие» вышележащие поглощающие пласты. Опыт эксплуатации показывает, что с ростом давлений (напряжений) в пласте приемистость скважины снижается, и закачка необходимых объемов пульпы становится затруднительной. Наличие метода контроля позволяет прогнозировать наполнение домена, своевременно готовиться к переходу на новые вышележащие пласты и планировать операционную деятельность компании. Например, это позволяет избегать начала буровых кампаний при заполненном домене поглощающих скважин, а сначала восстанавливать их поглощающую способность и только затем приступать к интенсивному бурению.

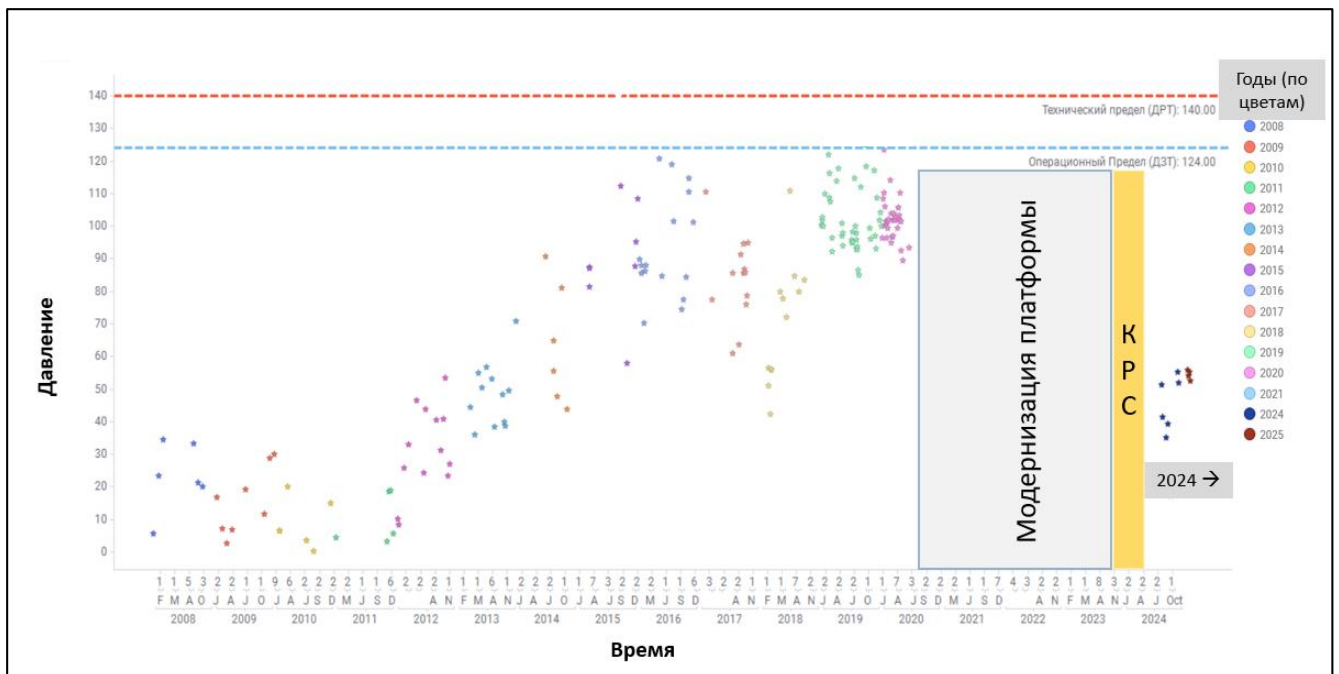


Рисунок 4.5 График зависимости давлений закрытия трещины времени и переход на другой домен, на примере скважины С-18 Астохского участка Пильтун-Астохского месторождения. Из ПО «eWellBook».

Было замечено, что в среднем в зависимости от конкретных геологических условий в конкретных скважинах срока эксплуатации («жизни») домена хватает от 6 до 12 лет. Как правило этого срока достаточно чтобы пробурить большинство скважин необходимых для разработки месторождений на море, дальнейшие кампании, например, перебурки скважин или бурения боковых стволов обычно требуют перевода поглощающей скважины на следующий вышележащий пласт-

домен. Эти сроки необходимо учитывать при планировании разработки месторождений и дальнейшей эксплуатации платформ.

Можно отметить высокую степень соответствия модельного поведения давления (рисунок 3.9) реальным данным (рисунки 4.2, 4.3, 4.5). Расчетная зависимость давления от времени имеет характерный экспоненциальный вид, схожий с реальными данными, что позволяет подтвердить и применимость разработанной теоретической модели для описания динамики состояния целевого пласта. Флуктуации в тренде роста давлений закрытия трещины до момента достижения операционного и технического пределов часто связаны с интенсивностью закачек во время бурения скважин, что обусловлено гидравлическим наполнением пласта-домена и воздействием поро-упругого эффекта.

Сами по себе данные об изменении давления демонстрируют эффективность разработанного подхода к определению операционного и технического пределов. На продемонстрированных примерах, а также в ряде других скважин, в которые производилась закачка буровых и технологических отходов, по мере приближения к операционному пределу, выполнялись специальные работы или проводился переход на другой домен. При этом не наблюдались катастрофические последствия прорыва пластов-флюидоупоров. Это позволяет констатировать, что разработанный подход действительно был применен для достижения безопасного процесса утилизации, однако служит лишь косвенным подтверждением того, что в ходе закачки зона влияния была локализована только в домене и не занимала области пластов-флюидоупоров.

Более прямым подтверждением безопасности размещения отходов служат результаты анализа данных разработанной системы наблюдений, в частности, проведение геофизических исследований и сейсмического мониторинга. По мере накопления опыта, уточнения геомеханической модели, управление безопасной закачкой на основе разработанного подхода к определению операционного и

технического пределов может частично или полностью заменить дорогостоящие исследования скважин или 4D-сейсмомониторинг.

4.2 Подтверждение безопасности размещения отходов методами сейсмического мониторинга

На месторождении организована система сейсмического мониторинга 4D, производятся регулярные сейсмические съемки. С помощью методов сейсмомониторинга реализуется 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. Рисунок 4.6 демонстрирует возникновение сети трещин, выделяющихся на дифракционных данных как выраженная голубая зона, распространяющаяся в юго-западном направлении от ствола скважины. Рост этой сети полностью совпадает с уровнем зоны перфорации, через которую производится закачка, и также подчиняется законам геомеханики, так как трещины развиваются в направлении максимального горизонтально напряжения в пласте, и перпендикулярно минимальному горизонтальному напряжению, определенному в ходе геомеханического моделирования (рисунок 4.7).

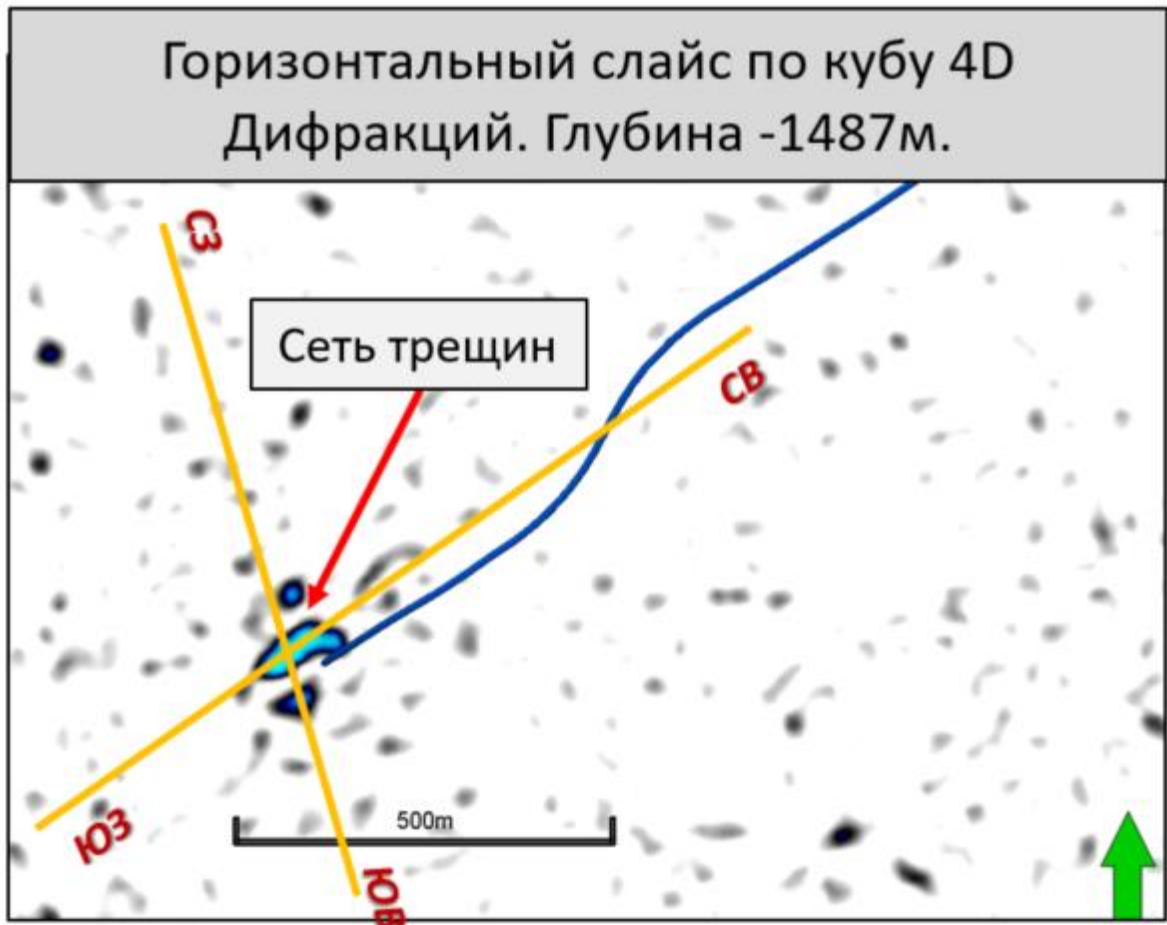


Рисунок 4.6 Горизонтальный срез по кубу 4D-Дифракций на скважине С-20.

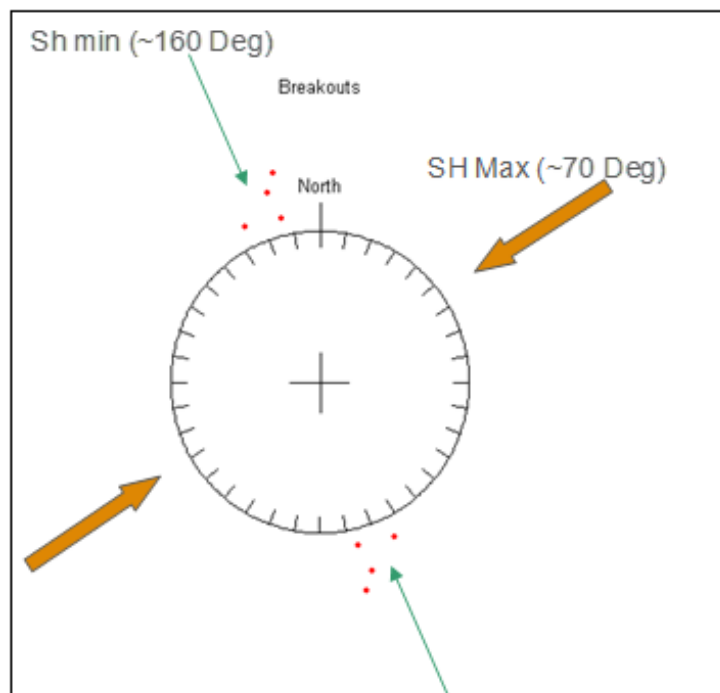


Рисунок 4.7. Направления максимальных и минимальных горизонтальных напряжений в целевом пласте-домене. Скважина С-20.

Если горизонтальное сечение сейсмического куба, представленное на рисунке 4.6, позволяет определить направление развития системы трещин и латеральные размеры этой зоны, то вертикальное сечение представляет возможность оценить вертикальное распространение нарушенной зоны и судить о том, проявляются ли изменения в вышележающем пласте флюидоупоре. Вертикальные сечения сейсмического куба в двух плоскостях (вдоль и в крест выделенному направлению развития зоны трещиноватости) представлены на рисунке 4.8.

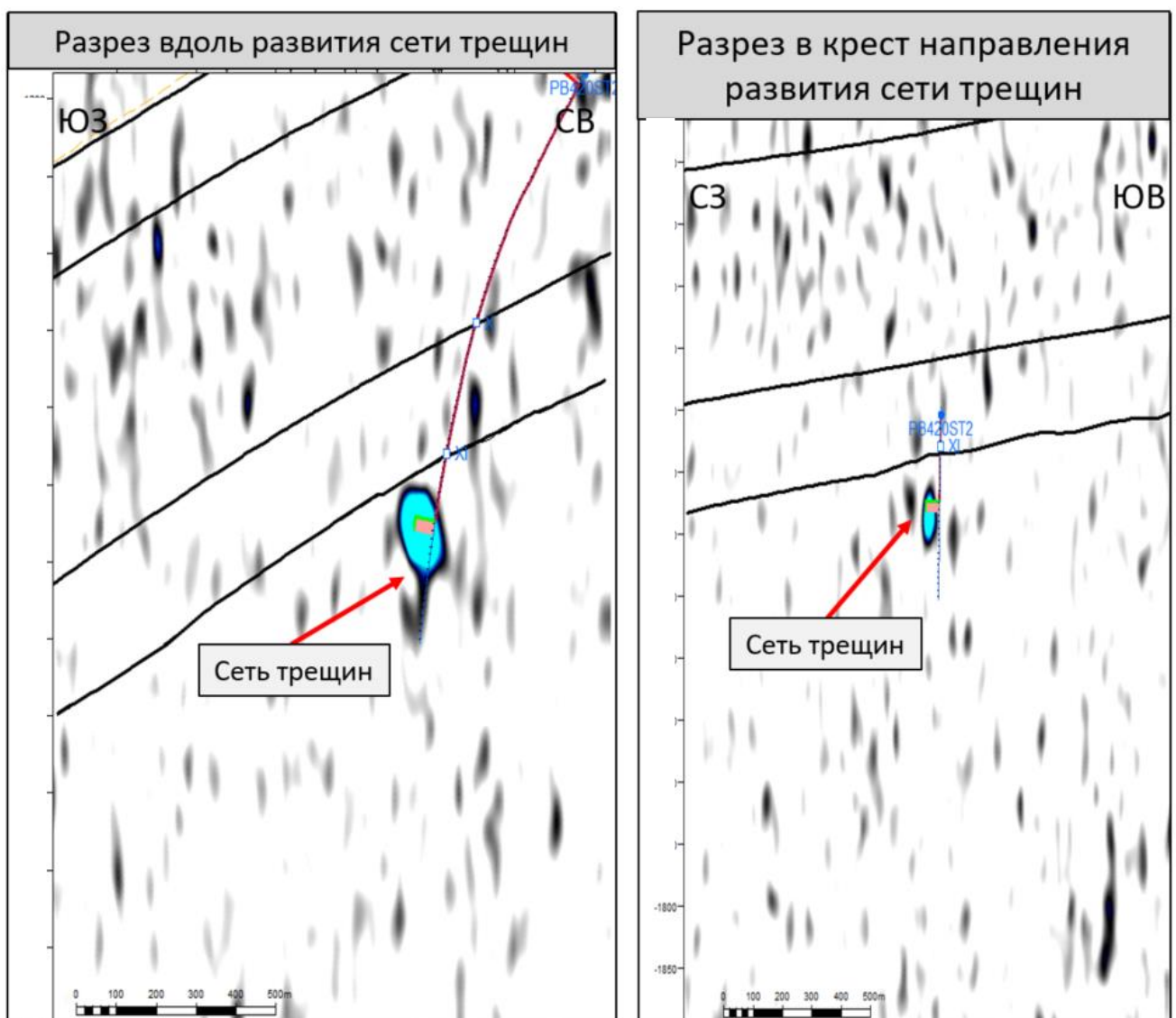


Рисунок 4.8 Разрезы вдоль и перпендикулярно сети образовавшихся трещин. Скважина С-20.

На вертикальных сечениях выделяемая сеть трещин стремится вверх в зоны меньших напряжений, но не пересекает зоны гидродинамических барьеров.

В области скважины С-18 (рисунки 4.9 – 4.11) наблюдается схожая картина, на дифракционных данных сейсмомониторинга выделяется сеть трещин, отходящая от основного ствола и образовавшая объем закачки. Рост сети полностью подчиняется законам геомеханики: трещины развиваются в направлении максимального горизонтально напряжения в пласте, и перпендикулярно минимальному горизонтальному напряжению. Также обращает на себя внимание то, что сеть трещин идет в пределах целевого пласта, стремится вверх в зоны меньших напряжений, но не пересекает зоны покрывающих флюидоупоров.



Рисунок 4.9 Горизонтальный срез по кубу 4D-Дифракций на скважине С-18.

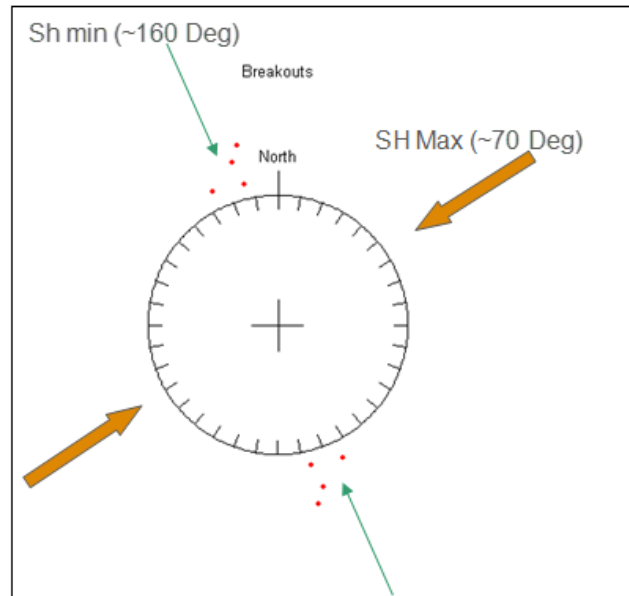


Рисунок 4.10 Направления максимальных и минимальных горизонтальных напряжений в целевом пласте-домене. Скважина С-18.

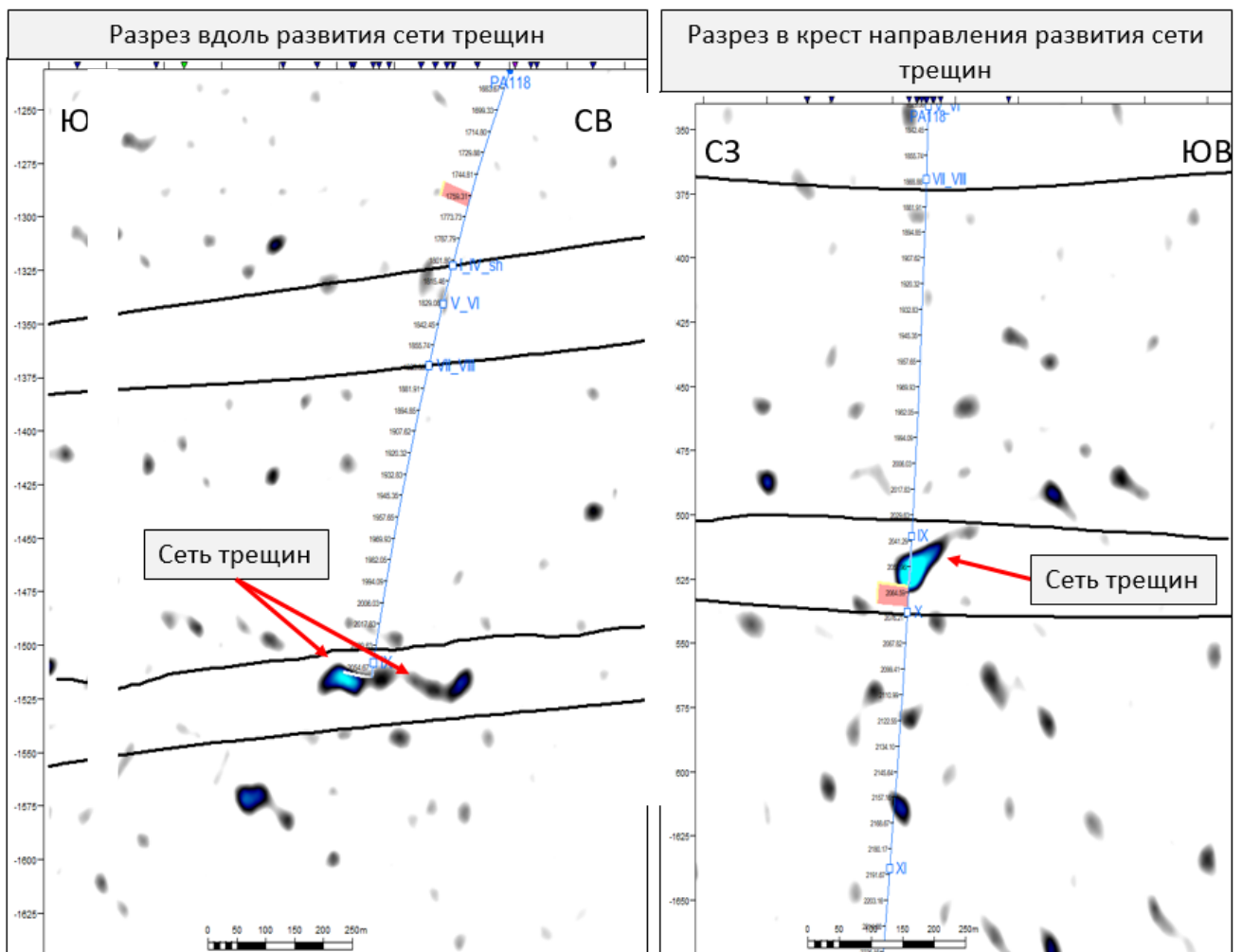


Рисунок 4.11 Разрезы вдоль и перпендикулярно сети образовавшихся трещин. Скважина С-18.

Показанные примеры демонстрируют, что в рассмотренных случаях (как и в других примерах скважин, на которых была реализована технология размещения отходов в глубокие горизонты недр) предложенная концепция позволила локализовать зону развития сети трещин только в целевом пласте – домене. Отсутствовали случаи прорыва трещин в вышележащие пласты флюидоупоры, благодаря чему процедура утилизации отходов бурения и технологических жидкостей может быть признана экологически безопасной.

4.3 Выводы по главе 4

Продемонстрированные примеры успешного применения технологии размещения отходов бурения и технологической жидкости в пласты-домены, сопровождающейся геофизическим и геомеханическим мониторингом состояния пластов-флюидоупоров, подтверждают снижение геологических и экологических рисков утилизации. Контроль состояния этих объектов дает возможность своевременно реагировать на изменения условий, адаптируя режим работы скважины, например, определяя момент перехода на новый домен, что сопровождается не только понижением рисков прорыва, но и существенным экономическим эффектом.

Показанные примеры подтверждают сформулированные выше защищаемые положения благодаря успешному применению разработанной методики для реальных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

В главе 1 представлен обзор различных методов обработки, утилизации и размещения отходов бурения и технологических жидкостей. Рассмотрены методы, реализуемые на различных месторождениях с учетом их специфики. Продемонстрировано, что технология размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр в подземных пластах-доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров является предпочтительной при освоении и разработке труднодоступных морских месторождений, в частности, месторождений материковой отмели острова Сахалин, что обосновывает защищаемое положение 1.

В главе 2 подробно рассмотрена технология размещения отходов бурения и технологических жидкостей, описаны основные этапы ее реализации. Предложена система комплексного геофизического изучения и мониторинга целевых пластов-доменов и пластов-флюидоупоров, использование которой позволяет реализовывать технологию размещения отходов в пластах-доменах с минимумом экологических и геологических рисков в соответствии с защищаемым положением номер 2.

Глава 3 посвящена концептуальному обоснованию технического и операционного пределов для размещения отходов бурения и технологических жидкостей путем закачки в пласты-домены. Представлена упрощенная математическая модель, которая позволяет прогнозировать изменение состояния целевого пласта-домена и пластов-флюидоупоров по мере закачки и приближение давления к критическому значению. Согласно защищаемому положению 3, разработанная концептуальная и математическая модель процесса позволяет использовать данные мониторинга для прогноза наполнения домена и достижения операционных пределов закачки отходов бурения в пласт со снижением геологических и экологических рисков.

В главе 4 представлены примеры практической реализации описываемой технологии, подтверждающие эффективность и безопасность применения технологии размещения при использовании разработанных моделей и методик геофизического мониторинга.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности и экологической безопасности разработки шельфовых месторождений путем успешного решения задачи обработки и размещения отходов бурения и технологических жидкостей. Можно рекомендовать применять описываемую технологию в условиях месторождений углеводородов, характеризующихся тяжелыми климатическими условиями и удаленностью объектов инфраструктуры: в тех случаях, когда описываемая технология действительно может считаться предпочтительной на основании анализа, подобного представленному в главе 1. При этом успешная реализация технологии обратной закачки требует организации системы мониторинга и активного использования результатов не только гидродинамического, но и геомеханического моделирования. Важно достоверно обосновать технические и операционные пределы работы скважин, учитывающие текущее состояние пластов-доменов и пластов-флюидопоров.

В то же время нельзя считать, что представленные в диссертации результаты успешно решают все задачи обработки, утилизации и размещения отходов бурения и технологических жидкостей. В частности, остро стоит вопрос об объемах домена и распространении фронта вытеснения при закачке жидкости в пласты-домены. Успешное решение такой задачи требует применения совмещенного гидродинамического и геомеханического моделирования или разработки специальных упрощенных моделей, позволяющих оценивать динамическое развитие системы трещиноватости, сопровождающее закачку. Решение этого вопроса можно отнести к приоритетным направлениям дальнейшего развития темы диссертационного исследования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Авто-ГРП – авто-гидроразрыв пласта

ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование

ГИС – геофизические исследования скважин

ГРП – гидравлический разрыв пласта

ДЗТ – давление закрытия трещины

ДРТ – давление распространения трещины

КРС – капитальный ремонт скважины

МиниГРП – мини-гидроразрыв пласта

НКТ – насосно-компрессорные трубы

ПА – Пильтун – Астохское месторождение, Астохский участок

ПБ - Пильтун – Астохское месторождение, Пильтунский участок

СВ – северо-восток

СЗ – северо-запад

ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства

ЦП – целевой пласт

ЮВ – юго-восток

ЮЗ – юго-запад

А – площадь поперечного сечения трещины (м²)

С – коэффициент потери жидкости

CRI (Cuttings Re-Injection) – обратная закачка бурового шлама (закачка в глубокие горизонты недр)

DAS – распределенные акустические датчики

DTS – распределенные температурные датчики

Е – модуль Юнга

FBR – давление разрыва пласта

FCS – давление закрытия трещины

FPP – давление распространения трещины

G-функция - математический инструмент, используемый в механике разрушения и гидродинамике трещин для анализа поведения трещин при закачке жидкости

G_h – минимальный потенциальный градиент (Па)

g – ускорение свободного падения (м/сек²)

H – высота трещины (м)

$H_{ж}$ – высота столба жидкости от поверхности до верха перфорации (м)

H_p – высота трещины, где начинаются утечки в пласт (м)

h – мощность пласта (м)

ISIP – мгновенное давление остановки закачки (Па)

K_{1C} – трещиностойкость пласта-флюидоупора

$K_{ДЗТ}$ – коэффициент контраста напряжений при закрытии трещины

$K_{ДРТ}$ – коэффициент контраста напряжений при распространении трещины

k – абсолютная проницаемость (м²)

k_r – относительная проницаемость (безразмерная)

l – половина высоты трещины (м)

LOP – давление начала утечки

LOT – тест на утечки

P – давление (Па)

$P_{гидр}$ – гидростатическое давление (Па)

$P_{зоны}$ – пластовое давление зоны размещения (Па)

P_i – начальное давление в пласте (Па)

P_{por} – поровое давление (Па)

$P(S)$ – давление на поверхности (Па)

P^* – давление на перфорации (Па)

Q – расход жидкости (м³/с)

$q(t)$ – расход флюида, задаваемый как начальное условие (м³/с)

r – радиус-вектор рассматриваемой точки в полярной системе координат, центр которой совпадает с центром скважины (м)

r_w – радиус скважины (м)

$S_h \max$ – максимальное горизонтальное напряжение

$S_h \min$ – минимальное горизонтальное напряжение

$S_h(r, 0)$ – распределение полных минимальных главных напряжений в пласте, которые, как предполагается, не зависят от времени

S_H – максимальное полное горизонтальное напряжение

S_h – минимальное полное горизонтальное напряжение

S_V – полное вертикальное напряжение

t – время (с)

t_0 – время, прошедшее от прекращения закачки до момента закрытия трещины в трещине в момент остановки закачки (с)

v – вектор скорости фильтрации (м/с)

z – координата на оси, параллельной оси скважины

α – экспериментально определяемый коэффициент

α_B – коэффициент Био

β_s – отношение среднего давления закачки к усредненному давлению жидкости

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига тела с Бингамовской реологией

$\delta_f(t)$ – расстояние, пройденное фронтом нагнетаемой жидкости (м)

ϵ_h и ϵ_H – горизонтальные деформации среды

η – вязкость при сдвиге (Па·с)

λ – потери жидкости на единицу длины трещины (м³/с/м)

μ_b – пластическая вязкость Бингама (Па·с)

ν – коэффициент Пуассона

ρ – плотность породы (кг/м³)

ρ_0 – удельная плотность флюида (кг/м³)

ρ_w – плотность флюида (кг/м³)

σ_1 – максимальное эффективное главное напряжение

σ_2 – среднее эффективное главное напряжение

σ_3 – минимальное эффективное главное напряжение

$\sigma_{\text{мин}}$ – минимальное горизонтальное напряжение

σ_{H} – максимальное эффективное горизонтальное напряжение

σ_{h} – минимальное эффективное горизонтальное напряжение

σ_{ij} – компоненты тензора эффективных напряжений

σ_{V} – эффективное вертикальное напряжение

τ' – время появления трещины в точке z (с)

τ – касательное напряжение

τ_0 – динамическое напряжение сдвига

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баюк И.О., Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А. Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов // ПроНефть. 2019. В. 3. С. 11–17.
2. 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. Т. 11. №1. С. 24–36.
3. Береснев А.В., Хабаров А.В., Иванцев И.М., Моисеенков А.В., Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г. Патент на изобретение № 2819034 «Способ захоронения буровых и технологических отходов при эксплуатации нефтегазоконденсатных, нефтяных и газовых месторождений». 2023.
4. Галактионов Э.Ю., Дашков Р.Ю., Колчанов И.В., Меньшиков С.Н., Морозов И.С., Осокин А.Б., Смолов Г.К., Старцев А.И., Столяров А.А., Хрулев А.А., Черепанов В.В. Патент на изобретение № 2438953. «Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемерзлых породах». 2010.
5. Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Ахметдинов А.М., Моисеенков А.В., Марченко А.В., Сычѐв О.Г. Основные принципы технологии обратной закачки бурового шлама, используемой для размещения буровых отходов в геологическом объекте // Нефтяное хозяйство. 2023. № 11. С. 138-143.
6. Королев Е.А., Ланда Е., Российская Е.М., Тимофеева О.В., Шевченков А.А. Патент на изобретение № 2789759 «Способ определения границ трещиноватой зоны». 2022.
7. Коршунова Т. Ю., Логинов О. Н. Нефтешламы: состояние проблемы в РФ и методы снижения их негативного воздействия на окружающую среду // Экобиотех. 2019. Т. 2. № 1. С. 75–85.
8. Литвякова О.О., Есинов Б.С., Птецов С.Н., Королев А.Е., Вороновичева Е.М., Передовые технологии обработки сейсмических данных с целью выделения

рассеянной компоненты волнового поля для прогнозирования свойств резервуара // Нефть. Газ. Новации. 2017. № 1. С 34.

9. Марченко А.В., Моисеенков А.В., Парфенов А.М., Хабаров А.В. Особенности программы исследований шельфовых месторождений на примере Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения проекта «Сахалин-2». // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Р. 216-226.

10. 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. Т. 25. № 4. С. 63–80.

11. 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.

12. Онофриенко С.А., Крымов А.В. Современные способы утилизации буровых отходов // Булатовские чтения. 2021. С.361–363.

13. Сержанин А.В., Моисеенков А.В., Кириченко С., Минимизация негативного воздействия на окружающую среду при размещении отходов бурения: практика и результаты // Чистый воздух. Спецвыпуск №1 (36). 2022. С. 8-11.

14. Федяев И.А., Выделение дифракционной компоненты поля на основе разделения волновых полей // Тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 25.00.10. 2021.

15. Abou-Sayed A.S. Drilling and Production Waste Injection in Subsea Operations - Challenges and Recommendations // Offshore Technology Conference Proceedings. 2002. P. 14288.

16. Adhami S., Jamshidi-Zanjani A., Darban A.K. Remediation of oil-based drilling waste using the electrokinetic-Fenton method // Process. Saf. Environ. Prot. 2021. V. 149. P. 432–441.

17. Agwu O.A., Ilori M.O., Nwachukwu S.U. Utilization of Drilling Fluid Base Oil Hydrocarbons by Microorganisms Isolated from Diesel-Polluted Soil // *Soil Sediment Contam.* 2013. V. 22. N. 7. P. 817–828.

18. Al-Ansary M.S., Al-Tabbaa A. Stabilisation/solidification of synthetic petroleum drill cuttings // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 141. N. 2. P. 410–421.

19. Al Isaee O.M., Smirnov D., Al Hadhrami A.; Mahrooqi A., Shabibi H., Ernest Sayapov E. I., Moiseenkov A.V., Kaabi S. A Novel Environmentally Friendly, Cost Effective Method for Hydraulic Fracture Geometry Evaluation: Cased Hole Cross-Dipole Data. // *SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, USA.* 2002. P. 209307-MS

20. Arfie M., Marika E., Purbodiningrat E.S., Woodard H.A. Implementation of Slurry Fracture Injection Technology for E&P Wastes at Duri Oilfield // *SPE Asia Pacific Health, Safety and Environment Conference and Exhibition Proceedings.* 2005. P. 96543-MS.

21. Baker B.D., Rieke H.H. A Balanced Approach to Waste Disposal using UFI (Underground Fracture Injection) // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition Proceedings.* 2001. P. 71433-MS.

22. Barree R.D. Application of Pre-Frac Injection/Falloff Tests in Fissured Reservoirs – Field Examples // *SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoirs Symposium Proceedings.* 1998. P. 39932-MS.

23. Barree R.D., Barree V.L., Craig D.P. Holistic Fracture Diagnostic // *Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium Proceedings.* 2007. P. 107877-MS.

24. Boutamine H., Salem Z., Khodja M. Petroleum drill cuttings treatment using stabilization/solidification and biological process combination // *Soil Sediment. Contam.* 2020. V. 29. N. 4. P. 369–383.

25. Bruno M., Reed A., Olmstead S. Environmental Management, Cost Management and Asset Management for High-Volume Oil Field Waste Injection Projects // *IADC/SPE Drilling Conference Proceedings.* 2000. P. 59119-MS.

26. Castillo J.L. Modified Fracture Pressure Decline Analysis Including Pressure-Dependent Leakoff // Proceedings of the SPE/DOE Joint Symposium on Low Permeability Reservoirs. Denver, Colorado: Society of Petroleum Engineers, 1987. P.273–281.
27. Chauvin E. Efficiency, Economics and Compliance: A Practical Planning Tool for Optimizing Cuttings Treatment // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference Proceedings. 2018. P. 192825-MS.
28. Chen L., Huang M., Jiang X., Li H., Chen Q., Zhang M. Pilot tests of microbe-soil combined treatment of waste drilling sludge // Nat. Gas Ind. 2015. V. 35. P. 100–105.
29. Cherepovitsyn A., Lebedev A. Drill Cuttings Disposal Efficiency in Offshore Oil Drilling // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. P. 317.
30. Daneshfar M.A., Ardjmand M. Selecting a suitable model for collecting, transferring, and recycling drilling wastes produced in the operational areas of the Iranian offshore oil company (IOOC) using analytical hierarchy process (AHP) // J. Environ. Manage. 2020. V. 259. P. 109791.
31. Darajah M.H., Karundeng I., Setiati R., Wastu A.R.R. Drilling waste management using zero discharge technology with Drill Cutting Re-injection (DCRI) method for environmental preservation // IOP Conf. Series: Earth Env. Sci. 2021. V. 802. P. 012046.
32. de Almeida P.C., Araújo O.d.Q.F., de Medeiros J.L. Managing Offshore Drill Cuttings Waste for Improved Sustainability // J. Clean Prod. 2017. 165. P. 143–156.
33. Deloge P.-A., Bouteica M.J. Fracture Propagation in Drill Cuttings Re-Injection: An Investigation Using Analytical Modelling // SPE European Formation Damage Conference Proceedings. P. 68928.
34. Dubinya N.V. Stress state estimation based on local variations of effective elastic moduli caused by presence of critically stressed fractures // 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium Proceedings. 2019. P. 19–139.
35. Dubinya N., Trimonova M., Tyurin A., Golovin Y., Zenchenko E., Samodurov A., Turuntaev S., Fokin I. Experimental and Theoretical Study of Fracture Toughness Effect

on Hydraulic Fracture's Geometry // SPE Russian Petroleum 484 Technology Conference Proceedings. 2018. P. 191630-18RPTC-MS.

36.Fan Y.-Y., Wang G.-C., Fu J.-H., Zheng X.-H. Bioremediation of waste drilling fluid: Comparison of biostimulation and bioaugmentation // Desalin Water Treat. 2012. V. 48. N. 1-3. P. 329–334.

37.Fragachán F., Ovalle A., Shokanov T. Pressure Monitoring: Key for Waste Management Injection Assurance // First International Oil Conference and Exhibition Proceedings. 2006. P. 103999-MS.

38.Gaarenstroom L., Tromp R.A.J., de Jong M.C., Brandenburg A.M. Overpressures in the Central North Sea: implications for trap integrity and drilling safety // Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series. 1993. V. 4, N 1. P.1305–1313.

39.Gaurina-Međimurec N., Matanović D., Simon K. Oil Field Waste Disposal Methods // Transactions of the VŠB-Technical University Ostrava, Mining and Geological Series, Monograph 15. Ostrava, Czech: Technical University Ostrava, 2005. P.67–70.

40.Gaurina-Međimurec N, Pašić B, Mijić P, Medved I. Deep Underground Injection of Waste from Drilling Activities—An Overview // Minerals. 2020. V. 10. N. 4. P. 303.

41.Gogan R., Mattia V., Oates M., Gumarov S., Shokanov T., Mangiameli R., Simmons S., Boyles G., Woolsley G. Cuttings Re-Injection as an Environmentally Safe and Economically Efficient Drilling Waste Management Option for Karachaganak Field // SPE Caspian Carbonates Technology Conference Proceedings. 2010. P. 139768-MS.

42.Gulrajani S.N., Nolte K.G. Fracture evaluation using pressure diagnostics. New York: John Wiley and Sons, 2000. P.A9-1–A9-4.

43.Guo Q., Abou-Sayed A.S., Engel H.R. Feeling the Pulse of Drill Cuttings Injection Wells – A Case Study of Simulation, Monitoring, and Verification in Alaska // SPE Journal. 2007. P. 458–467.

44.Guo Q., Geehan T., Pincock M. Managing Risks and Uncertainties in Drill Cuttings Re-Injection in Challenging Environments – Field Experience from Sakhalin Island //

SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference Proceedings. 2005. 93781-MS.

45. Guo C., Wang X., Li C., Zhang K., Cai Z. The application of the yield approach to study slurry migration in drill cuttings waste underground disposal // *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 254. 26 p.

46. Hickman S.H., Zoback M.D. The interpretation of hydraulic fracturing pressure time data for in situ stress determination // *Hydraulic Frac. Meas.* 1983. P. 44–54.

47. Hongmei T., Xiaoming W., Hongliang N. The optimization of rheological model // *Trenchless Technologies*. 2008. V. 25. P.1–4.

48. Hou Y., Qi S., You H., Huang Z., Niu Q. The study on pyrolysis of oil-based drilling cuttings by microwave and electric heating // *J. Environ. Manage.* 2018. V. 228. P. 312–318.

49. Imam A., Suman S.K., Ghosh D., Kanaujia P.K. Analytical approaches used in monitoring the bioremediation of hydrocarbons in petroleum-contaminated soil and sludge // *TrAC - Trends Anal Chem.* 2019. N. 118. P. 50–64.

50. IPIECA, OGP. *Drilling Fluids and Health Risk Management: A Guide for Personnel, Managers and Health Professionals in the Oil and Gas Industry* // IPIECA/OGP report 396. 2009.

51. Ismail A.R., Alias A.H., Sulaiman W.R.W., Jaafar M.Z., Ismail I. Drilling Fluid Waste Management in Drilling for Oil and Gas Wells // *Chem. Eng. Trans.* 2017. V. 56. P. 1351–1356.

52. John Pichtel. *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial* // 2nd Edition. 2014. 682 p.

53. Ji L.L., Shokanov T.A., Fragachan F.E., Ovalle A., Ronderos J. Multi-fracture complexities in drilling waste injection: wagon-wheel uniform disposal domain or secondary fracture branching // *Proceedings of the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. Asheville, North Carolina: American Rock Mechanics Association, 2009. 10 p.

54. Jorissen F.J., Bicchi E., Duchemin G., Durrieu J., Galgani F., Cazes L., Gaultier M., Camps R. Impact of oil-based drill mud disposal on benthic foraminifer assemblages on the continental margin off Angola // *Deep-Sea Research II*. 2009. V. 56. P. 2270–2291.

55. Kazamias G., Zorpas A.A. Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy // *J. Cl. Prod.* 2021. V. 322. P. 129098.

56. Keck R.G. Drill Cuttings Injection: A Review of Major Operations and Technical Issues // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2002. P. 77553.

57. Khanpour R., Sheikhi-Kouhsar M.R., Esmailzadeh F., Mowla D. Removal of contaminants from polluted drilling mud using supercritical carbon dioxide extraction // *J. Supercrit. Fluids*. 2014. V. 88. P. 1–7.

58. Kirkness A., Garrick D. Treatment of Nonaqueous-Fluid-Contaminated Drill Cuttings—Raising Environmental and Safety Standards // *In Proceedings of the All Days*, Orlando, FL, USA, 4 March 2008; SPE: London, UK, 2008

59. Ma B., Wang R., Ni H., Wang K. Experimental study on harmless disposal of waste oil based mud using supercritical carbon dioxide extraction // *Fuel*. 2019. V. 252. P. 722–729.

60. Mahrous R., Tsoy V., Ellis R. Customized High-Rate Cuttings Reinjection System: Effective Design Maintains Continuous Zero Discharge Operations on Sakhalin Island // *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition Proceedings*. 2019. P. 194070-MS.

61. Marinello S.A., Lyon F.L., Ballantine W.T. Disposal of E&P Waste by Injection: An Assessment of Technology and Regulatory Impacts // *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference Proceedings*. 2001. P. 66521-MS

62. Marketz F., Brown D., Alyabiev R., Khudorozhkov P., Sychov O. Offshore CRI Well Performance Diagnostics and Fractured Domain Mapping Using Injection Data Analytics and Hydraulic Fracturing Simulation, Verified Through 4D Seismic and

Wireline Logging // SPE Annual Technical Conference and Exhibition Proceedings. 2021. P. 205896-MS.

63.McAuliffe C.D., Palmer L.L. Environmental Aspects of Offshore Disposal of Drilling Fluids and Cuttings // SPE California Regional Meeting Proceedings. 1976. P. 5864

64.Moiseenkov A.V., Smirov D., Al Hadhrami A., Agrawal P., Harrisi A., Manthari M., Busaidi A., Khairutdinov F., Sayapov E.I., Isae O. Successful Unconventional Fracturing Tight and Highly Laminated Silicilyte Reservoir Leading to Economic Field Development // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE. 2021. P. 207818-MS

65.Mehtar M., Haddad M., Toki T., Gumarov S., Benelkadi S., Shokanov T., Vizzini C., Mitchell C., Khudorozhkov P. Feed to Execution: First Successful Hydraulic Fracture Cuttings Re-Injection Process Offshore Abu Dhabi // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference Proceedings. 2016. P. 183521-MS.

66.Melton H.R., Smith J.P., Mairs H.L., Bernier R.F., Garland E., Glickman A.H., Jones F.V., Ray J.P., Thomas D., Campbell J.A. Environmental aspects of the use and disposal of non aqueous drilling fluids associated with offshore oil & gas operations // 7th SPE International Conference of Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Proceedings. 2004 P. 86696.

67.Mengying S., Jingen D., Chengyun M., Yongcun F., Bin L., Tie G. Optimization of cuttings slurry system for re-injection of oil-based drilling cuttings // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023. V. 45. P.2753–2770.

68.Mkpaoro M.I.F., Okpokwasili G.C., Joel O.F. A Review of Drill-Cuttings Treatment and Disposal Methods in Nigeria- The Gaps and Way Forward // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition Proceedings. 2015. P. 178325-MS.

69.Mukherjee S., Gupta A.K., Chhabra R.P. Laminar forced convection in powerlaw and Bingham plastic fluids in ducts of semi-circular and other cross-sections // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 104. P.112–141.

70. Leonard S.A., Stegemann J.A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: Leaching studies // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 174. N. 1-3. P. 484–491.

71. Ling L.H., Lye K.H., Shern L.S. Environmentally Sustainable and Cost Effective Offshore Disposal of Drilling Wastes: A Review of Current Practice in Malaysia // *SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility Conference Proceedings*. 2017. P. 185191-MS.

72. Nadeem M., Dusseault M.B. Geological Engineering Criteria for Deep Solids Injection // *Environ. Geosci.* 2007. V. 14. P. 61–77.

73. Nolte K.G. Determination of Fracture Parameters From Fracturing Pressure Decline // *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Las Vegas, Nevada: Society of Petroleum Engineers, 1979.

74. Nordgren R. Propagation of Vertical Hydraulic Fracture // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1972. V. 12, N 4. P.306–314.

75. Novikova E.V., Trimonova M.A., Dubinya N.V., Turuntaev S.B., Zenchenko E.V. Estimation of breakdown pressure in laboratory experiments on hydraulic fracturing // *Mat. Phys. Mech.* 2023. V. 51. N. 5. P. 52–65.

76. Nwonodi R.I., Okoro E.E., Dosunmu A. The radial distribution of natural fracture density around the wellbore during drilled cuttings/produced water reinjection and well construction // *Geoen. Sci. Eng.* 2024. V. 234. P. 212613.

77. OGP. Environmental Aspects of the Use and Disposal of Non Aqueous Drilling Fluids Associated with Offshore Oil & Gas Operations // OGP report 342. 2003.

78. OSPAR. OSPAR Decision 2000/2 on a Harmonised Mandatory Control System for the Use and Reduction of the Discharge of Offshore Chemicals // *OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment in the North-east Atlantic*, Meeting of the OSPAR Commission. 2000.

79. Paulsen J.E., Omland T.H., Igeltjorn H., Aas N., Solvang S.A. Drill Cuttings Disposal, Balancing Zero Discharge and Use of Best Available Technique // *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition Proceedings*. 2003. P. 85296-MS

80.Pereira L.B., Sad C.M.S., da Silva M., Corona R.R.B., dos Santos F.D., Gonçalves G.R. Oil recovery from water-based drilling fluid waste // *Fuel*. 2019. V. 237. P. 335–343.

81.Petronas. PETRONAS Procedures and Guidelines for Upstream Activities (PPGUA). 2014.

82.Poclin H.R., Watanabe J.F., Ortiz H. Commingled Reinjection of Cuttings and Produced Water Provides a Zero-Discharge Solution for the Development Phase of the Pirana Field in the Peruvian Amazon Region // *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings*. 2015. P. 177225-MS.

83.Prats M. Effect of burial history on the subsurface horizontal stresses of formations having different material properties // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1981. V. 21, N 6. P.658–662.

84.Rana S. Facts and Data on Environmental Risks—Oil and Gas Drilling Operations // In *Proceedings of the All Days, Calgary, AB, Canada, 20–23 October 2008*; SPE: London, UK.

85.Razmgir S.M., Afsari M., Amani M. Drilling Waste Management: A Case Study of the Drilling Waste Management and Environmental Control in one of the Iranian Offshore Fields // *SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition Proceedings*. 2011. P. 142487-MS.

86.Reinicke A., Rybacki E., Stanchits S., Huenges E., Dresen G. Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms—Implications from laboratory testing of tight sandstone–proppant systems // *Geochem*. 2010. V. 70. S. 3. P. 107–117.

87.Robinson J.P., Kingman S.W., Snape C.E., et al. Remediation of oil-contaminated drill cuttings using continuous microwave heating // *Chem. Eng. J*. 2009. V. 152. N. 2-3. P. 458–463.

88.Ronald B. Stone. Underground storage of hazardous waste // *Volume 14, Issue 1*. 1987. P. 23-37

- 89.Saasen A., Tran T.N., Joranson H., Meyer E., Gabrielsen G., Tronstad A.E. Subsea Re-Injection of Drilled Cuttings - Operational Experience // SPE/IADC Drilling Conference Proceedings. 2001. P. 67733.
- 90.Shadizadeh S.R., Majidaie S., Zoveidavianpoor M. Investigation of drill cuttings reinjection: environmental management in Iranian Ahwaz oilfield // Petroleum Science and Technology. 2011. V. 29, N 11. P.1093–1103.
- 91.Shell. Global Environmental Standard. 2007.
- 92.Shen X., Shen G., Standifird W. Numerical Calculation of Fault Reactivation and Resultant Seismic Behavior Related to Cuttings Reinjection in Offshore West Africa // 49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium Proceedings. 2015. P. 15-0216.
- 93.Shioya Y., Yamamoto K., Fujieda T., Kikuchi S., El-Khatib H. Cuttings reinjection to shallow undersea formation: The Geomechanical acceptance analysis using hydraulic fracturing simulator // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference Proceedings. 2002. P. SPE-78586-MS.
- 94.Shokanov T.A., Ronderos J.R., Gumarov S., Fragachan F. Multiple-fractures propagation, orientation and complexities in drilling waste injection // Proceedings of SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2011. 14 p.
- 95.Simonson E.R., Abou-Sayed A.S., Clifton R.J. Containment of massive hydraulic fractures // Society of Petroleum Engineers Journal. 1978. V. 18, N 1. P.27–32.
- 96.Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K., Dikshit A.K. An overview of sustainability assessment methodologies // Ecol. Indic. 2012. V. 15. P. 281–299.
- 97.Smirnov D., Al Isaee O., Moiseenkov A.V., Al Hadhrami A., Shabibi H., Kaabi S., Sayapov E.I. Integrated Hydraulic Fracture Geometry Evaluation Based on Pre-Cambrian Tight Silicylate Reservoir in South Oman Salt Basin // SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, Muscat, Oman. 2022. P. 205276-MS
- 98.Street C.G., Tesche C., Guigard S.E. Treatment of Hydrocarbon-based drilling waste using supercritical carbon dioxide // SPE Drill. Complet. 2009. P. 413–417.

99. Svensen T., Taugbol K. Drilling Waste Handling in Challenging Offshore Operations // SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition Proceedings. P. 149575-MS.
100. Tang C., Xie S.X. Resource recovery and harmless treatment of waste oil-in-water drilling fluid // Environ. Eng. Res. 2017. V. 22. N. 3. P. 277–280.
101. USEPA. 40 CFR Parts 9 and 435 [FRL-6929-8] RIN 2040-AD14 Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Oil and Gas Extraction Point Source Category; OMB Approval Under the Paperwork Reduction Act: Technical Amendment // 66 Federal Register 14. 2001.
102. Vadinal R.B., Reis L.S.T., Del Claro D.R., Ceolin S.P., Bernardes M.C.d.C.P. Lessons Learned from Cuttings Treatment at Offshore Wells in the Campos Basin // Offshore Technology Conference Brasil Proceedings. 2019. P. 29919-MS.
103. Veil J.A., Dusseault M.B. Evaluation of Slurry Injection Technology for Management of Drilling Wastes // Environmental Science, Engineering, 2003. 110 p.
104. Wasantha P.L.P., Konietzky H., Xu C. Effect of in-situ stress contrast on fracture containment during single- and multi-stage hydraulic fracturing // Engineering Fracture Mechanics. 2019. V. 205. P. 175-189.
105. Wisen J., Chesnaux R., Wendling G., Werring J., Barbecot F., Baudron P. Assessing the potential of crosscontamination from oil and gas hydraulic fracturing: a case study in northeastern British Columbia, Canada // Journal of Environmental Management. 2019. V. 246. P.275–282.
106. Wu Y., Pruess K. A numerical method for simulating non-Newtonian fluid flow and displacement in porous media // Advances in Water Resources. 1998. V. 21, N 5. P.351–362.
107. Xu H. Harmless Disposal Technology of Waste Drilling Fluid in Liaohe Oilfield // Appl. Mech. Mat. 2014. V. 675-677. P. 674–679.
108. Al-Yaarubi A., Al Bimani S., Al Rahbi S., Leech R., Smirnov D., Moiseenkov A.V., Sayapov E.I., Isaee O. Applying Slim Dipole Sonic Tool to Evaluate Hydraulic Fracture Geometry and Orientation Using the Differential Sonic Method. //

SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition, Muscat, Oman. 2022. P. 205329-MS

109. Yamamoto K., Nakama Y. Geometry of the fracture for cuttings reinjection operation and solid concentration: a numerical study // Proceedings of Gulf Rocks 2004 – 6th North America Rock Mechanics Symposium. Houston, TX: American Rock Mechanics Association, 2004. P.1–7.

110. Zhang S., Feng Y., Li B., Deng J., Geng T., Zhang J. Fracture development during disposal of hazardous drilling cuttings by deep underground injection: A review // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2022. V. 14. P. 1652–1670.

111. Zhu Z., Li J., Xie S., Yuan G. Research and application on resource utilization technology of oily waste drilling fluid // Pet. Sci. Technol. 2011. V. 29. N. 14. P. 1470–81.

112. Zhu M.J., Liu H.J., Yao J., Luo Q.H. Chemical demulsification - ultrasonic recycle oil from oil-based drilling fluid using response surface methodology // Adv. Mater. Res. 2014. V. 955–959. P. 2653–2657.