

На правах рукописи



ШАЛЯПИНА АДЕЛЯ ДАНИЯРОВНА

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ
СОХРАНЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПРИ
БУРЕНИИ СКВАЖИН**

Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и в ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг».

Научный руководитель: **Кузнецов Владимир Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Бурение нефтяных и
газовых скважин» ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный университет».

Официальные оппоненты: **Исмаков Рустэм Адипович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Бурение нефтяных
и газовых скважин» ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет»;

Коваль Максим Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель генерального директора по
инжинирингу бурения ООО «Самарский
научно-исследовательский и проектный
институт нефтедобычи».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «10» апреля 2025 года в 13 часов 30 минут на
заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625039
г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском
комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и
на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат диссертации разослан «03» марта 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Опыт бурения скважин на месторождениях в интервалах с зенитными углами более 60° показывает, что существует высокая вероятность возникновения осложнений, обусловленных наличием во вскрываемых разрезах неустойчивых глинистых пород. Осыпи и обвалы возникают при бурении скважин на геологических объектах Сургутского (пласты АС₉, БС₁₁) и Вартовского сводов (пласты АВ₂, АВ_{8/1}, БВ₁, БВ₃). При этом вероятность возникновения осыпей и обвалов глинистых отложений выше при бурении боковых стволов, чем при строительстве наклонно направленных скважин, на 48 %.

Согласно результатам анализа баланса календарного времени строительства скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», установлено, что в период с 2018 по 2023 гг. при бурении боковых стволов на месторождениях Сургутского и Вартовского сводов зафиксировано 413 различных осложнений, из которых 35 % связано с неустойчивостью стенок скважин при бурении в интервалах глинистых пород. Время, затраченное на ликвидацию осложнений, связанных с дестабилизацией стенок скважины, составило в среднем 15 % от общего времени строительства боковых стволов.

В частности, опыт вскрытия пласта БВ₁ Ватъеганского месторождения показывает, что неустойчивость покочевско-савуйских отложений ванденской свиты произошла на 17 из 22 скважин, пробуренных в период с 2018 по 2023 гг. Среднее значение непроизводительного времени, связанного с ликвидацией осыпей и обвалов, составило 17,2 % от общего времени строительства скважин.

Неснижающаяся динамика возникновения дестабилизации глинистых отложений обуславливает необходимость разработки стабилизирующей технологической жидкости, способной предупреждать осыпи и обвалы при бурении боковых стволов в рассматриваемых интервалах.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями и разработкой технологий стабилизации глинистых пород при бурении скважин занимались О. К. Ангелопуло, В. С. Баранов, Ю. М. Басарыгин, А. И. Булатов, А. А. Васильченко, В. С. Войтенко, М. М. - Р. Гайдаров, В. Д. Городнов, Дж. Р. Грей, Г. С. Г. Дарли, К. Ф. Жигач, А. М. Киреев, Г. В. Конесев, К. Н. Кулиев, В. А. Мосин, Ю. М. Проселков, П. А. Ребиндер, В. И. Рябченко, E. Van Oort, A. F. Boyd, T. I. Ballard и другие ученые. Такие технико-технологические решения, как использование профильного перекрывателя, спуск промежуточной обсадной колонны, применение высокоингибированных, катионных, эмульсионных, углеводородных буровых растворов, направлены на обеспечение безаварийного бурения в интервалах, сложенных неустойчивыми отложениями. Данные методы недостаточно обеспечивают стабильность глинистых пород и влекут дополнительные затраты. Эти обстоятельства требуют разработку стабилизирующей технологической жидкости для обеспечения стабильности стенок скважин в интервалах, сложенных неустойчивыми глинистыми отложениями, в частности, покачевско-савуйской пачки глин Ватьеганского месторождения и для быстринских отложений Восточно-Перевального месторождения.

Цель диссертационной работы

Повышение эффективности строительства боковых стволов в интервалах залегания неустойчивых глинистых отложений путем применения технологической жидкости.

Основные задачи исследования

1. Установить причины обвалообразований глинистых пород, возникающих при бурении боковых стволов на месторождениях, расположенных в пределах Сургутского и Вартовского сводов Западной Сибири.

2. Создать стабилизирующую технологическую жидкость, предназначенную для предупреждения осыпей и обвалов глинистых

отложений, и выполнить оптимизацию ее состава с учетом горно-геологических условий бурения боковых стволов.

3. Разработать методику проведения лабораторных исследований по оценке устойчивости глинистых отложений в технологической жидкости с учетом влияния бурового раствора, находящегося во взаимодействии с горной породой.

4. Провести опытно-промышленные испытания технологической жидкости при бурении боковых стволов в неустойчивых глинистых отложениях месторождений Сургутского и Вартовского сводов.

Объектом исследования являются неустойчивые глинистые отложения месторождений Сургутского и Вартовского сводов.

Предметом исследования – физико-химические механизмы, направленные на сохранение устойчивости глинистых пород при бурении боковых стволов.

Научная новизна работы

1. Обоснован комплексный физико-химический механизм ингибирования (замещение катионов металлов в межслоевом пространстве глинистых минералов на катион калия); укрепления стенок скважины (заполнение порового и трещиноватого пространств гелевым образованием поливалентных металлов и силикатами щелочных металлов); гидрофобизации поверхности глинистых отложений асфальтенами.

2. Получена математическая модель, позволяющая регулировать время устойчивого состояния глинистых отложений при бурении боковых стволов на месторождениях Сургутского и Вартовского сводов.

3. Разработана методика проведения лабораторных исследований воздействия технологических жидкостей на неустойчивые глинистые породы с учетом влияния составов буровых растворов.

Теоретическая значимость работы

1. Теоретически обосновано комплексное действие на неустойчивые глинистые породы среднего катагенеза путем применения реагентов, обладающих ингибирующим, крепящим и гидрофобизирующим свойствами.

2. Установлены закономерности ранжирования по эффективности химических реагентов, используемых при разработке технологической жидкости, по видам действия: ингибирование (хлорид калия, полиэтиленгликоль, формиат калия, карбоксилигносульфонат пековый, карбонат калия); укрепление стенок скважины (силикаты натрия, калия); гидрофобизация (комплексный реагент сульфированный асфальт и окисленный битум, битуминозный водорастворимый сульфонат, сульфированный асфальт, природный асфальт), что позволило осуществить выбор наиболее эффективных реагентов и обосновать их влияние на время устойчивого состояния глинистых образцов.

Практическая значимость работы

1. Разработанная технологическая жидкость позволила обеспечить устойчивость глинистых отложений в стабильном состоянии на протяжении 13 суток при бурении боковых стволов (патент на изобретение РФ № 2787698).

2. Разработанная технологическая жидкость применена при бурении боковых стволов скважин № 527Л куста № 12 Восточно-Перевального месторождения и № 706Л куста № 27 Ватъеганского месторождения, что позволило пробурить боковые стволы без осложнений, и получить потенциальный экономический эффект от недопущения затрат на ликвидацию осложнений в размере 6,1 млн руб.

Методология и методы исследования

Поставленные задачи решались путем анализа и обобщения результатов научных разработок и промысловых сведений, содержащихся в опубликованных научных источниках и патентах российских и зарубежных специалистов, проведения экспериментальных исследований с применением оборудования ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» в аккредитованной лаборатории, использования математических инструментов и вычислительных алгоритмов при анализе полученных результатов. Опытно-промышленные испытания выполнены на месторождениях, разрабатываемых ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

Положения, выносимые на защиту

1. Сохранение устойчивости глинистых пород, склонных к обвалообразованию, обеспечивается комплексным действием ингибирования механизма гидратации и набухания, их укреплению путем образования кремниевого геля, гидрофобизации поверхности стенок скважины использованием технологической жидкости.

2. Применение разработанной методики оценки устойчивости глинистых отложений позволяет прогнозировать их поведение в технологической жидкости при бурении боковых стволов.

3. Состав разработанной технологической жидкости, содержащий карбоксиметилцеллюлозу (1,5-3,5 %), силикат натрия (4,5-7 %), хлорид калия (9-15 %), полиэтиленгликоль (0,1-0,4 %), сульфированный асфальт и окисленный битум (1-3 %), позволяет сохранить устойчивость глинистых образцов на 13,5 часов в лабораторных условиях.

Личный вклад автора заключается в анализе причин возникновения осыпей и обвалов глинистых пород, возникающих при бурении боковых стволов, проведенном на основании обзора научных источников; в обосновании выбора химических реагентов, входящих в состав технологической жидкости, предназначенной для сохранения устойчивости глинистых отложений; в оптимизации ее состава; в разработке методики проведения лабораторных исследований воздействия технологических жидкостей на неустойчивые глинистые породы с учетом влияния составов буровых растворов; в написании разделов диссертационной работы; в подготовке к публикации научных статей.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Экспериментальные исследования выполнены в соответствии с ГОСТ в аккредитованной лаборатории ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». В качестве исследуемого материала использован образец керна, отобранный в интервале покрышки пласта БВ₁ Ватьеганского месторождения с глубины 2388-2396 м по абсолютной отметке. Результаты интерпретации лабораторных опытов базируются на проведенных расчетах в программном обеспечении Statistica и соответствуют классическим математическим

подходам по установлению коэффициентов детерминации, находятся в диапазоне допустимых доверительных интервалов. Достоверность выводов подтверждается фактическими результатами проведенных опытно-промышленных испытаний разработанной технологической жидкости при бурении боковых стволов на Восточно-Перевальном и Ватъеганском месторождениях; публикациями в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ; апробациями на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов

Результаты исследований по теме диссертационной работы представлены на следующих конференциях: Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева (Тюмень, 2019-2023 гг.); Международной академической конференции «Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири» (Тюмень, 2020 г.); Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых им. академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2020-2021 гг.); X Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (Тюмень, 2020 г.); Национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации» (Тюмень, 2020-2021 гг.); Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» (Москва, 2020, 2022 гг.); XIV Международном научно-техническом конгрессе студенческого отделения общества инженеров-нефтяников SPE (Тюмень, 2021 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2020-2022 гг.); Международной научно-практической конференции «Научная территория: технологии и инновации» (Тюмень, 2022-2023 гг.); Международной научно-практической конференции «Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого-техническими условиями их разработки» (Тюмень, 2021-2024 гг.).

Публикации

Основные результаты отражены в 21 научной работе: 5 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; 15 статьях в сборниках материалов международных и национальных научно-практических конференций; патенте на изобретение № 2787698.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Тема работы и ее содержание соответствует формуле специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин в части пункта 5. «Осложнения и предупреждение осложнений при строительстве скважин. Прогнозирование аварийных инцидентов с буровым инструментом, факторов, влияющих на риски при строительстве скважин. Технологии и технические средства для ликвидации осложнений и аварий в скважине. Методы и технологии обеспечения устойчивости ствола скважины»; пункта 7. «Физико-химические процессы в объеме технологических жидкостей. Составы, свойства и технологии применения технологических жидкостей, химических реагентов для бурения и освоения скважин. Фильтрационные процессы в скважине».

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 149 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений, списка использованных источников, включающего 112 наименований. Работа содержит 20 таблиц, 36 рисунков и 6 приложений.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору В. Г. Кузнецову и профессорско-преподавательскому составу кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» Тюменского индустриального университета. Автор признателен коллегам ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» за практические советы, корректировки и обеспечение внедрения результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности решаемой научной задачи, сформулированы цель и задачи работы, приведены сведения по научной новизне, теоретической значимости и защищаемым положениям.

В первой главе приведен результат анализа научных работ российских и зарубежных ученых, посвященных физико-химическим механизмам гидратации и набухания глинистых пород и технико-технологическим решениям по предотвращению обвалов стенок скважин. Приведены результаты анализа опыта строительства боковых стволов на Ватьеганском месторождении, которые свидетельствуют об опасности возникновения осыпей и обвалов покрышки продуктивного пласта БВ₁ – неустойчивой покочевско-савуйской глинистой пачки, залегающей на глубинах по абсолютной отметке 2100-2300 м с аномально низким пластовым давлением, равным 19,0-19,5 МПа и пластовой температурой 70-80 °С. Эти глубины характеризуются наличием глинистых пород среднего катагенеза, для которых наиболее характерны такие глинистые минералы, как хлорит, гидрослюда и смешанно-слоистые образования. Катионообменная емкость покочевско-савуйской глинистой пачки составляет 30 мЭкв/100, что является значительной величиной и свидетельствует о высокой способности глин к гидратации и набуханию.

Для обеспечения безаварийного бурения в интервалах неустойчивых глинистых отложений Сургутского и Вартовского сводов используются многокомпонентные промывочные жидкости (растворы на углеводородной основе, катионные и ингибированные хлоркалиевые растворы), блокирующие жидкости и специализированный инструмент (бицентричные, сферичные долота, профильные перекрыватели, раздвижные расширители), применение которых влечет дополнительные капиталовложения в строительство боковых стволов. Увеличение плотности бурового раствора для стабилизации глинистых пород ограничено низким давлением начала поглощения в выше и ниже залегающих пластах. В случае применения промывочной жидкости с плотностью 1200 кг/м³ и более происходит поглощение

бурового раствора, поэтому особенно важен подбор состава технологической жидкости для снижения рисков обвалообразования. Изучение опыта бурения и аналитический обзор научных источников позволили установить основные причины неустойчивости глин среднего катагенеза, в частности покачевско-савуйской пачки:

1. нарушение естественного напряженно-деформированного состояния глинистой породы, которое определяется ее литогенетической характеристикой и результатом воздействия фильтрата бурового раствора;

2. кристаллическое набухание, возникающее в результате адсорбции мономолекулярных слоев воды на базальных поверхностях кристаллов глинистых минералов, как наружных, так и межслоевых.

Практический опыт бурения боковых стволов в интервалах неустойчивых глинистых отложений, в частности, глин сангопайской, ванденской свит месторождений Сургутского и Вартовского сводов, в период с 2018 по 2023 гг. позволил сформировать технико-технологические способы предупреждения неустойчивости стенок скважины:

1. применение растворов на водной основе с высокими ингибирующими свойствами (ингибированные хлоркалиевые, катионные системы);

2. применение буровых растворов на безводной основе, которые не оказывают разупрочняющего действия на глинистые породы, при этом сохраняют их естественные прочностные характеристики (растворы на углеводородной основе, инвертные эмульсионные растворы);

3. спуск и установка профильных перекрывателей, промежуточных колонн, способствующих сохранению номинального диаметра ствола скважины;

4. применение технологических жидкостей, образующих упругий гидрофобный непроницаемый слой, повышающий стабильность стенок скважины.

Указанные технико-технологические решения позволили снизить риски обвалообразования, однако универсального решения безаварийного

бурения боковых стволов в интервалах неустойчивых глинистых отложений до настоящего времени не получено.

Во второй главе обоснован выбор наиболее эффективных химических реагентов, описана методика разработки стабилизирующей жидкости для сохранения устойчивости глинистых пород и произведен выбор лабораторного оборудования.

Проведенные постановочные лабораторные эксперименты позволили определить наиболее эффективные в своем классе реагенты и граничные значения изменения их концентраций. Результаты приведены в главе 3. Для разработки и оптимизации рецептуры стабилизирующей жидкости составлена матрица планирования эксперимента по методу Бокса-Бенкена. Она проверена на симметричность, нормирование и ортогональность, что необходимо для обеспечения независимости коэффициентов регрессии. В соответствии с составленной матрицей выполнены основные лабораторные исследования разработанной жидкости на модифицированном фильтр-прессе высокого давления и температуры. Модификация прибора осуществлена путем установки в нижней части ячейки глинистого образца, цилиндрическая поверхность которого изолируется эпоксидной смолой. На основе опыта применения идентичных стабилизирующих жидкостей в схожих горно-геологических условиях при бурении в глинистых отложениях среднего катагенеза получена линейная зависимость между лабораторным временем стабильного состояния глинистых образцов и фактическим временем устойчивого состояния стенок скважин в промысловых условиях.

В качестве целевого параметра установлено время стабильного состояния глинистых отложений, равное 13,5 часам в лабораторных условиях, что соответствует 13 суткам (312 часов) в скважинных условиях (Рисунок 1). Данное значение устойчивого состояния обеспечивает безаварийное строительство бокового ствола от начала бурения в интервале залегания неустойчивых отложений до спуска фильтра-хвостовика. Значение целевого параметра установлено на основании проведенного анализа бурения 127 боковых стволов в период с 2018 по 2023 гг.

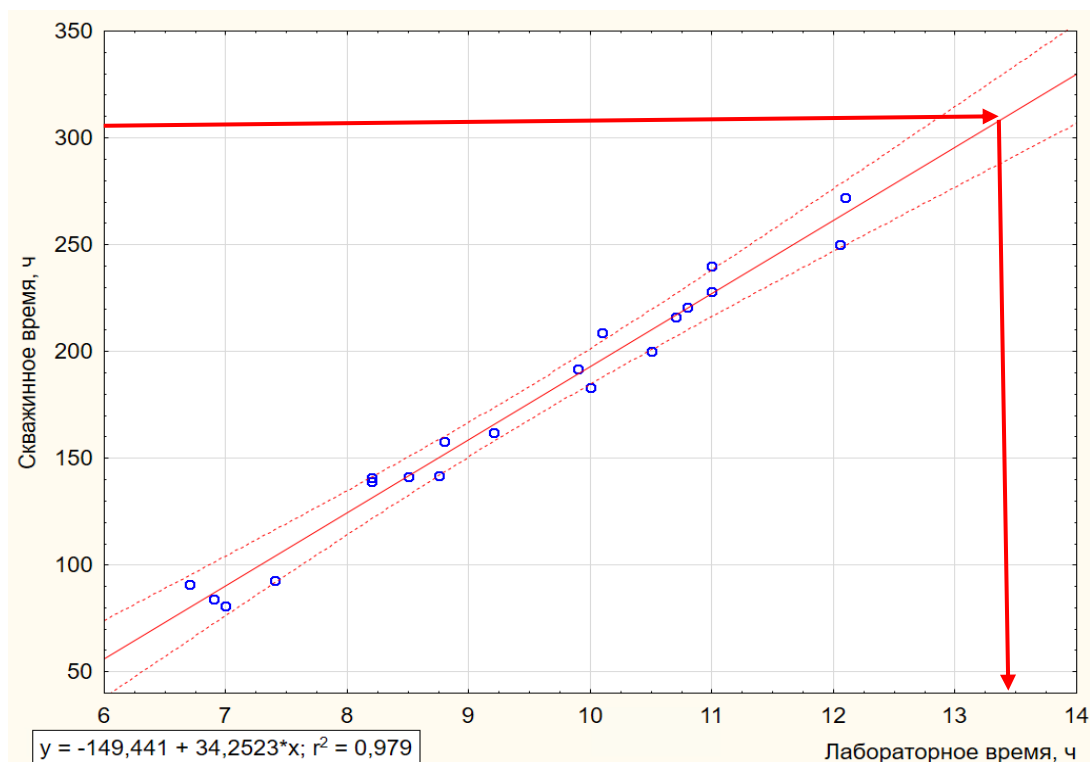


Рисунок 1 – Зависимость скважинного и лабораторного времени стабильного состояния глинистого образца

На завершающем этапе проведено лабораторное моделирование взаимодействия разработанного состава с биополимерным хлоркалийевым буровым раствором с целью определения продолжительности стабильного состояния глинистого образца. Проведены лабораторные опыты по оценке совместимости технологической жидкости и модельного биополимерного хлоркалийевого раствора, который в настоящее время наиболее широко применяется при бурении боковых стволов.

В третьей главе приведены результаты лабораторных экспериментов по разработке технологической жидкости и оптимизации ее состава. Несущей основой для стабилизирующей жидкости является водный раствор карбоксиметилцеллюлозы. Согласно полученным результатам исследований по определению прочности образца керна после воздействия на него пресными буровыми биополимерными растворами с добавлением 2 % Ингидола ГГЛ, Асфасола, Гильсонита и Soltex и последующего термостатирования, установлено, что Ингидол ГГЛ оказывает наилучшее стабилизирующее действие на глинистый образец (Рисунок 2).

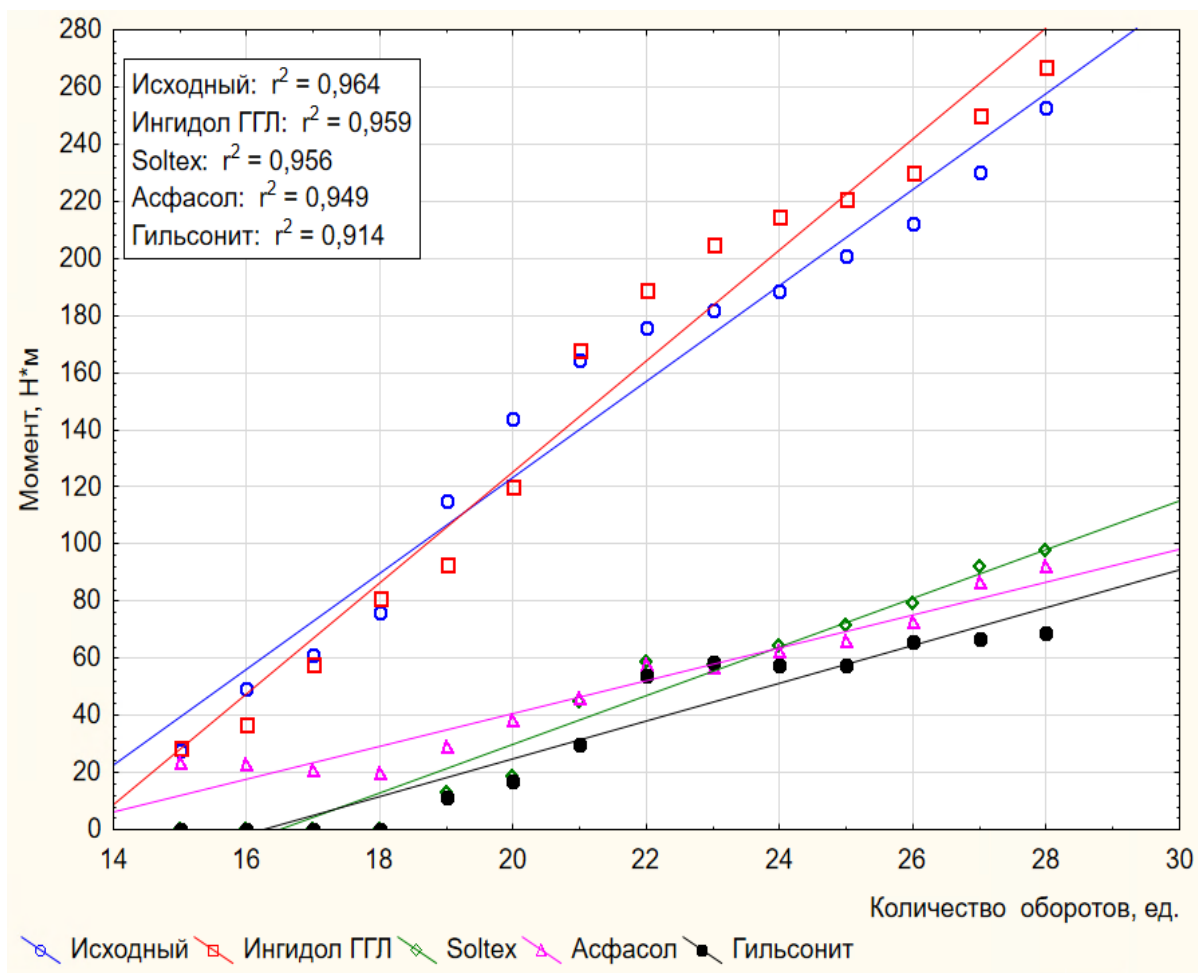


Рисунок 2 – Зависимость прилагаемого на глинистый образец усилия от его прочности в среде исследуемых химических реагентов

Исследованы наиболее широко применяемые реагенты для стабилизации неустойчивых пород: силикаты калия и натрия с силикатным модулем 2,2 ед. и другие неорганические соли (формиат, хлорид, карбонат калия), карбоксилигносульфонат пековый, полиэтиленгликоль (ПЭГ). Таким образом, приготовлены 17 водных растворов. Согласно экспериментам на тестере линейного набухания по определению наиболее эффективных реагентов, установлено, что наилучшие результаты имеют хлорид калия, силикат натрия и полиэтиленгликоль. На Рисунке 3 приведены результаты исследований линейного увеличения глинистого образца керна в составах 1 и 3. Аналогичные исследования проведены для других 15 растворов.

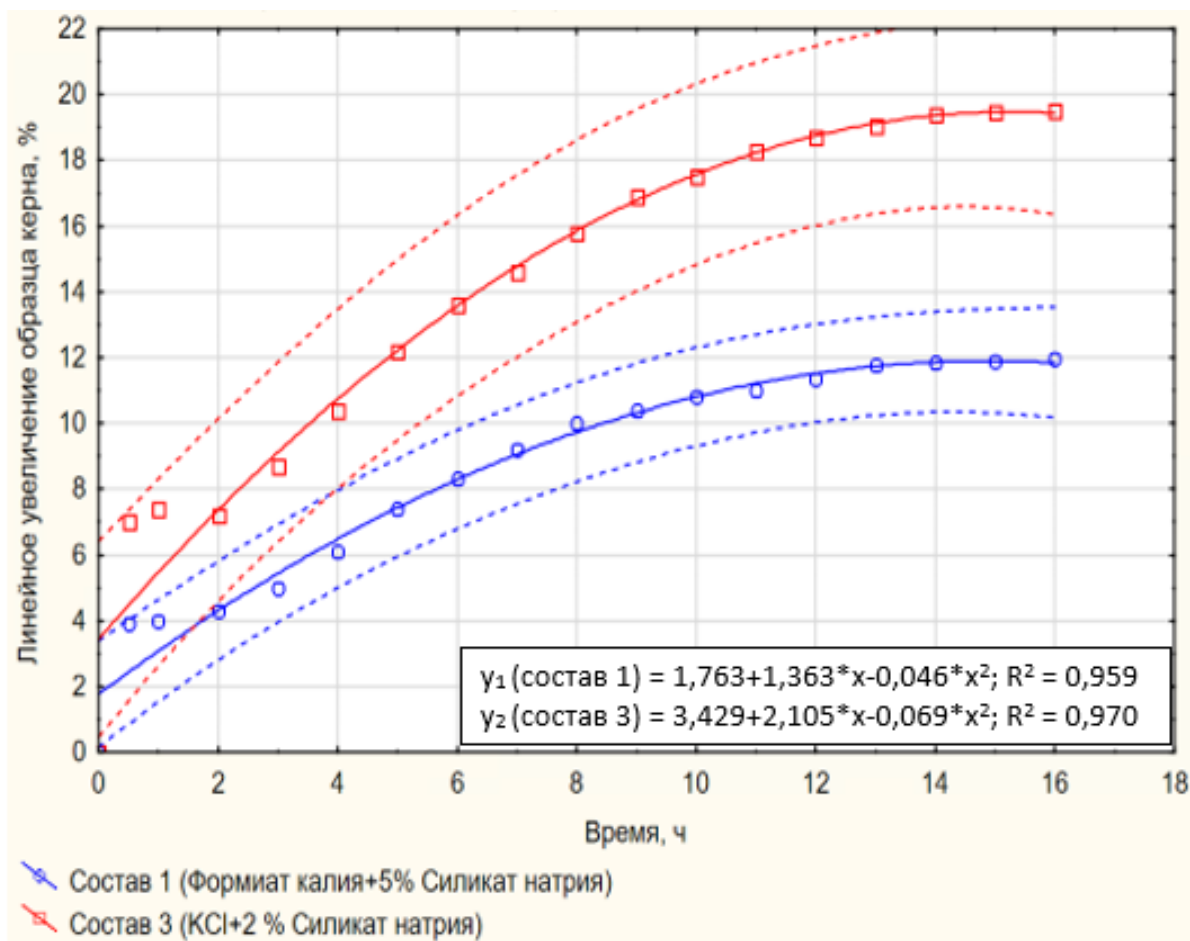


Рисунок 3 – Динамика линейного увеличения глинистых образцов керна в составах 1 и 3

Согласно проведенному ранжированию по виду действия и эффективности, выделены реагенты, используемые в разработке технологической жидкости для следующих физико-химических механизмов: гидрофобизации (Ингидол ГГЛ, Soltex, Асфасол, Гильсонит); ингибирования (хлорид калия, полиэтиленгликоль, формиат калия, карбоксилигносульфонат пековый, силикат калия, карбонат калия); крепления стенок скважины (силикаты натрия и калия). Сформирована матрица планирования эксперимента, включающая 3 уровня варьирования значений входных данных и состоящая из 46 вариаций исследованного состава стабилизирующей жидкости. Целевым параметром является время стабильного состояния глинистого образца, равное 13,5 часам в лабораторных условиях (Таблица 1).

Таблица 1 – Фрагмент матрицы планирования эксперимента по оптимизации состава стабилизирующей жидкости

№ опыта	Концентрации реагентов, %			Темпер., °С	Время стабильного состояния, ч
	Хлорид калия (x ₁)	Силикат натрия (x ₂)	Полиэтиленгликоль (x ₃)		
1	7.50	2.50	0.20	75.00	6.70
2	15.00	2.50	0.20	75.00	12.92
3	7.50	6.50	0.20	75.00	8.70
...	
46	11.25	4.50	0.20	70.00	12.10

Результаты опытов проверены на воспроизводимость методом расчета коэффициента Кохрена, математическая значимость параметров определена путем нахождения коэффициентов Стьюдента. Полученное уравнение в неявном виде оценено на адекватность коэффициентом Фишера (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты статистической проверки математической модели

Критерий проверки	Значение	Результат проверки
Критерий Кохрена	$G < G_{кр}$ 0,0318 < 0,158	Результаты воспроизводимы
Критерий Стьюдента	$t_i > t_{кр}$ Хлористый калий: 2,959 > 0,41 Силикат натрия: 1,416 > 0,41 Полиэтиленгликоль: 0,575 > 0,41 Температура: 0,20 < 0,41	Исключена температура
Критерий Фишера	$F < F_{кр}$ 1,10 < 1,44	Модель адекватна
Коэффициент детерминации	96,4 %	Высокая точность модели

Проведена оптимизация состава технологической жидкости с помощью графического (построение поверхностей отклика) и аналитического (построение профилей желательности) методов в программном комплексе Statistica (Рисунок 4, Рисунок 5).

На Рисунке 4 показано влияние содержания силиката натрия и хлорида калия на время стабильного состояния глинистого образца. Увеличение концентрации хлористого калия свыше 14 % не способствует дальнейшему увеличению времени стабильности глинистого образца. Отмечено, что увеличение содержания силиката натрия положительно влияет на время стабильного состояния.

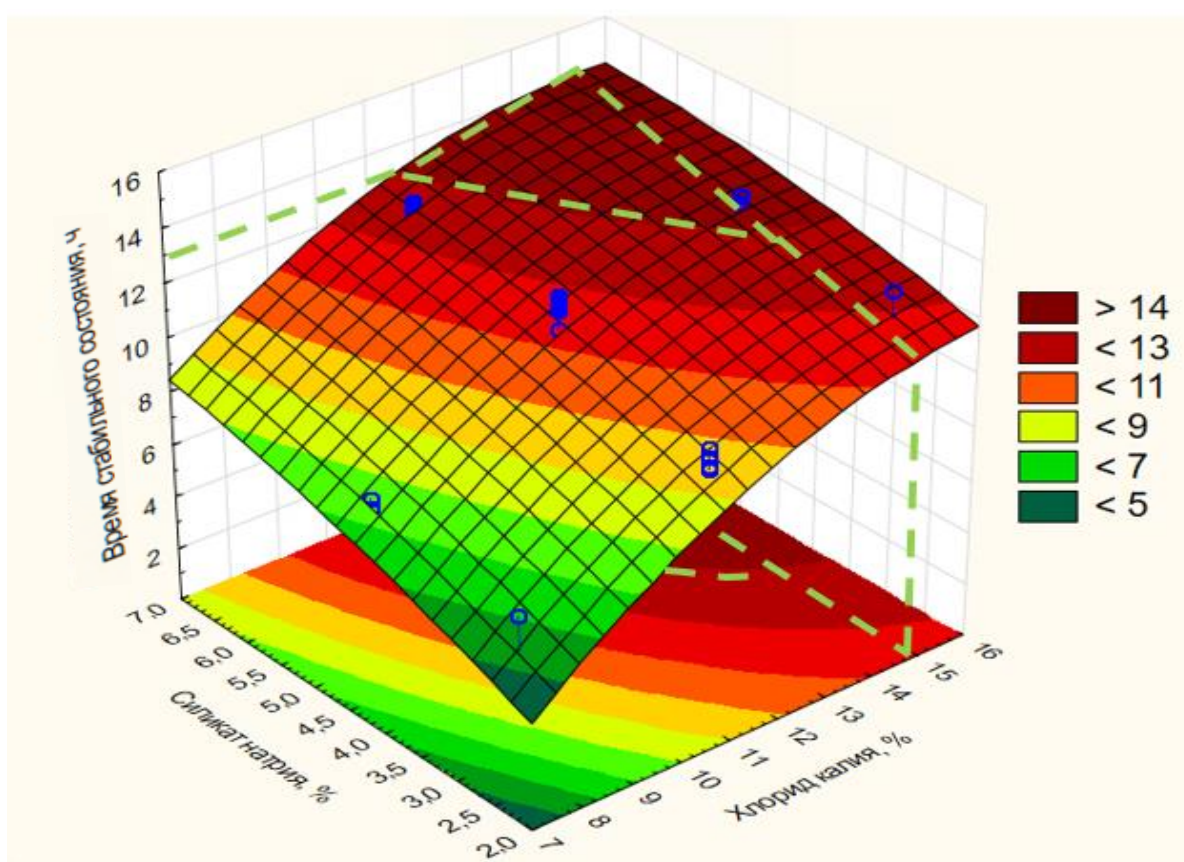


Рисунок 4 – Влияние хлорида калия и силиката натрия на время стабильного состояния глинистого образца

Согласно проведенной с помощью построения профилей желательности оптимизации, состав стабилизирующей жидкости позволяет обеспечить 13,5 часов стабильного состояния покачевско-савуйской пачки глинистых отложений. Установлено, что с вероятностью более 94,6 % при температуре 70 °С и концентрациях хлористого калия – 9,0-15,0 %,

силиката натрия – 4,5-7,0 %, ПЭГ – 0,1-0,4 % достигнуто 13 суток стабильного состояния глинистых отложений, что соответствует требуемой величине целевого параметра. Дальнейшее увеличение концентрации реагентов не приводит к повышению эффективности по сохранению устойчивости глинистых пород (Рисунок 5).

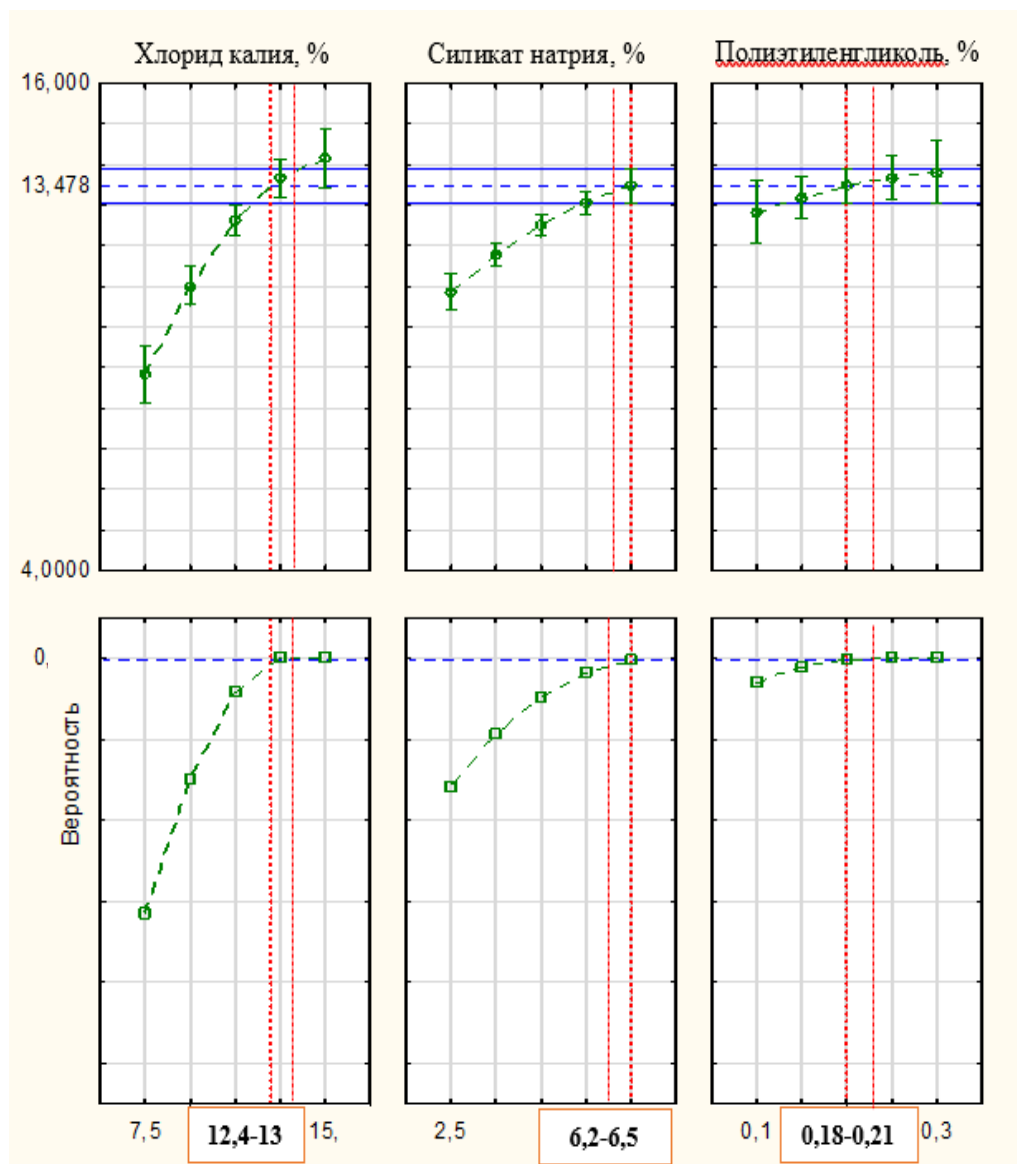


Рисунок 5 – Профили желательности целевой функции

В результате проведения лабораторных исследований на модифицированном фильтр-прессе высокого давления и температуры и в соответствии с матрицей планирования эксперимента, получена математическая модель управления составом в неявном виде, которая позволяет оценить значимость каждого химического реагента:

$$Y=10,964 +2,959 \cdot X_1+1,416 \cdot X_2+5,75 \cdot X_3. \quad (1)$$

Анализ уравнения (1) показывает, что функция отклика повышается с увеличением каждого из факторов. Наибольшее влияние оказывает фактор X_3 . Для регулирования времени стабильного состояния глинистого образца модель (1) преобразована из неявного в явный вид путем декодирования:

$$T=0,749 + 0,789 \cdot KCl + 0,708 \cdot ЖС + 5,75 \cdot ПЭГ, \quad (2)$$

где T – время устойчивого состояния глинистой горной породы, сут.; KCl – содержание хлорида калия, %; $ЖС$ – содержание силиката натрия, %; $ПЭГ$ – содержание полиэтиленгликоля, %. Факторные коэффициенты имеют размерность сут./%.

На завершающем этапе разработки стабилизирующей жидкости проведено лабораторное исследование взаимодействия жидкости с используемыми при бурении боковых стволов различными буровыми растворами на модернизированном фильтр-прессе (Рисунок 6).

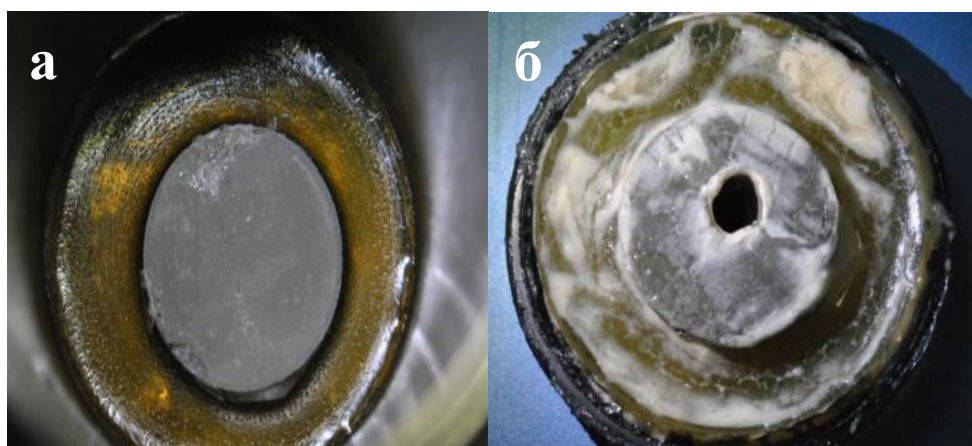


Рисунок 6 – Внешний вид кернового образца в ячейке фильтр-пресса до (а) и после (б) воздействия на него стабилизирующей жидкости

Поэтапное воздействие технологической жидкости и буровых растворов позволило подтвердить эффективность разработанного состава (время стабильного состояния глинистого образца составляет 13,5 часов) и установить наиболее релевантный к разработанному составу буровой раствор (Таблица 3).

Таблица 3 – Время устойчивого состояния глинистого образца после воздействия различных растворов (фрагмент таблицы)

№ п/п	Этапы последовательного воздействия составов			Время стабильного состояния, ч
	1 этап (0,5 ч)	2 этап (3 ч)	3 этап (0,5 ч)	
1	Водный раствор хлористого натрия	–	–	0,75
...
10	Биополимерный хлоркалийевый буровой раствор	Разработанная технологическая жидкость	Биополимерный хлоркалийевый буровой раствор	13,5

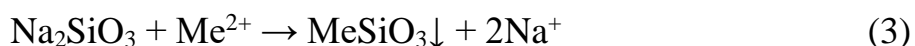
В Таблице 4 приведен оптимальный компонентный состав стабилизирующей жидкости после проведения лабораторных экспериментов и применения методов математического моделирования.

Таблица 4 – Состав разработанной технологической жидкости

Наименование реагента	Назначение реагента	Концентрация реагента, мас. %
Силикат натрия	Крепящая добавка	4,5-7,0
Карбоксиметилцеллюлоза КМЦ-85/700	Понизитель фильтрации	1,5-3,5
Хлорид калия	Ингибитор набухания	9,0-15,0
Полиэтиленгликоль ПЭГ-2000		0,1-0,4
Комплексный реагент Ингидол ГГЛ	Гидрофобизатор	1,0-3,0
Вода техническая	Дисперсионная среда	71,1-84,0

Повышение стабильности неустойчивых пород, слагающих стенки скважин, достигается за счет комплексного действия: изменения ионного комплекса глинистых отложений, силикатизации активных участков; гидрофобизации и заполнения порового, трещиноватого пространств

силикатами натрия и продуктами их взаимодействия с солями поливалентных металлов Me^{2+} , находящихся в структуре глинистых интервалов:



Проведено определение совместимости бурового раствора и стабилизирующей жидкости. Она оценивалась путем измерения углов закручивания пружины вискозиметра исходных контактирующих друг с другом растворов и их смеси в соотношениях 3:1, 1:1, 1:3 при температуре 80 °С. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанная технологическая жидкость совместима с модельным биополимерным хлоркалиевым раствором.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний разработанной стабилизирующей жидкости на скважине № 527Л куста № 12 Восточно-Перевального месторождения и на скважине № 706Л куста № 27 Ватьеганского месторождения. Представлен сравнительный экономический анализ стоимости применения разработанной жидкости и непроизводительных работ по сохранению устойчивости стенок скважин.

В процессе бурения бокового ствола скважины с горизонтальным окончанием № 527Л куста № 12 Восточно-Перевального месторождения в интервале 2649-2716 м по стволу возникли осыпи и обвалы в интервале глинистых пород. Проектный пласт AC_9 расположен на глубине 2279 м по вертикали. Для бурения первого, а затем и второго ствола использовался биополимерный хлоркалиевый буровой раствор в сочетании с кольматирующим составом. Данное решение не позволило поддержать ствол скважины в интервале залегания глинистых отложений в стабильном состоянии, что привело к прихвату компоновки с последующей установкой цементных мостов. В результате непроизводительное время при бурении двух стволов скважины составило 1360 часов. При бурении третьего ствола, после вскрытия склонных к осыпям и обвалам глинистых пород, закачали на 3 часа и оставили под избыточным давлением, равным 3 МПа, разработанную стабилизирующую жидкость, что позволило закончить строительство бокового ствола без осложнений. Длительность выдержки

состава обоснована результатами лабораторных исследований, согласно которым за 3 часа образуется прочный кремниевый гель.

При строительстве бокового ствола скважины № 706Л куста № 27 Ватьеганского месторождения в интервале 2353-2375 м по стволу произошли осыпи покачевско-савуйской глинистой пачки. Проектный пласт БВ₁ расположен на глубине 2456 м по вертикали. При бурении в интервале этих отложений применили разработанный состав стабилизирующей жидкости в объеме 5 м³ с задавкой под избыточным давлением, равным 3 МПа, на аналогичный период времени для прохождения процесса по укреплению стенок скважины.

В результате проведения опытно-промышленных испытаний установлено, что стабильность неустойчивых отложений сохранена на протяжении более 13 суток. Применение разработанной стабилизирующей жидкости позволило получить потенциальный экономический эффект от недопущения затрат на ликвидацию осложнений при бурении двух боковых стволов в размере 6,1 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены причины обвалообразования глинистых пород, возникающих при бурении боковых стволов на месторождениях, расположенных в пределах Сургутского и Вартовского сводов Западной Сибири. К ним относятся нарушение естественного напряженно-деформированного состояния глинистой породы, гидратация и набухание глинистых минералов.

2. Создана стабилизирующая технологическая жидкость, предназначенная для предупреждения осыпей и обвалов глинистых отложений, на основе водного раствора полимера карбоксиметилцеллюлозы с добавкой активных по отношению к набухающим глинам компонентов – хлорида калия (9,0-15,0 %), силиката натрия (4,5-7,0 %), полиэтиленгликоля (0,1-0,4 %) и комплексного реагента, представляющего собой окисленный асфальт и сульфированный битум Ингидол ГГЛ (1,0-3,0 %); выполнена оптимизация ее состава с учетом горно-геологических условий, возникающих при бурении боковых стволов.

3. Разработана методика проведения лабораторных исследований по оценке устойчивости глинистых пород в технологической жидкости с учетом влияния бурового раствора, находящегося во взаимодействии с горной породой, в соответствии с которой осуществлены лабораторные испытания на модернизированном фильтр-прессе, и определена продолжительность устойчивого состояния глинистых образцов, равная 13,5 часам.

4. Проведены опытно-промышленные испытания технологической жидкости при бурении боковых стволов в глинистых отложениях месторождений Сургутского и Вартовского сводов, которые позволили обеспечить их устойчивость на протяжении более 13 суток, и получить потенциальный экономический эффект от недопущения затрат на ликвидацию осложнений в размере 6,1 млн руб.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бакирова (Шаляпина), А. Д. Проблемы и решения, возникающие при бурении скважин в неустойчивых глинисто-аргиллитовых породах / А. Д. Бакирова, Д. В. Шаляпин, Э. В. Бабушкин [и др.]. - Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2020. - № 2 (140). - С. 18-25.

2. Шаляпина, А. Д. Разработка стабилизирующей глинисто-аргиллитовые породы ванны с помощью планирования эксперимента по методу Бокса-Бенкена / А. Д. Шаляпина, Д. В. Шаляпин, Д. Л. Бакиров [и др.]. - Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2021. - № 2 (146). - С. 66-77.

3. Шаляпина, А. Д. Совершенствование методики проведения экспериментов по созданию технологических жидкостей для стабилизации глинистых горных пород / А. Д. Шаляпина. - Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2022. - № 6 (354). - С. 27-32.

4. Шаляпина, А. Д. Обзор технологических решений по стабилизации глинисто-аргиллитовых горных пород при бурении боковых стволов

скважин / А. Д. Шаляпина. - Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2022. - № 10 (358). - С. 33-37.

Публикации в прочих научных изданиях:

5. Шаляпина, А. Д. Применение методов статистического анализа для создания стабилизирующей глинисто-аргиллитовые породы ванны / А. Д. Шаляпина, Д. В. Шаляпин, В. Г. Кузнецов. - Текст : непосредственный // Материалы Национальной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации». Том 1. - Тюмень : ТИУ, 2020. - С. 110-112.

6. Шаляпина, А. Д. Поиск комплексного решения для экономически обоснованного подхода к стабилизации неустойчивых глин / А. Д. Шаляпина, В. Г. Кузнецов. - Текст : непосредственный // Материалы III Международной научно-практической конференции «Referatotech». - Краснодар : Новация, 2022. - С. 576-579.

Патент на изобретение:

7. Пат. на изобретение № 2787698 Российская Федерация, МПК С09К8/575. Технологическая жидкость для закрепления неустойчивых глинисто-аргиллитовых отложений в нефтяных и газовых скважинах : № 2022113154 : заявл. 16.05.2022 : опубл. 11.01.2023 / Бакиров Д. Л., Бабушкин Э. В., Фаттахов М. М., Грицай Г. Н., Шаляпин Д. В., Шаляпина А. Д., Ваулин В. Г., Волкова Л. А. ; патентообладатель ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». - Текст : непосредственный.

Подписано в печать 03.02.2025. Формат 60x90 1/16. Усл. авт. л. 1,05.

Тираж 100 экз. Заказ № 2987.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.