

На правах рукописи

Ульянова Зоя Валериевна



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ ОСЫПАЮЩИХСЯ
ЛИТИФИЦИРОВАННЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД
ПРИМЕНЕНИЕМ КАТИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ
В СОСТАВЕ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ**

Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Чернышов Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Овчинников Василий Павлович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин», заведующий кафедрой;

Нечаева Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», институт нефтегазовых технологий, директор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится **18 декабря 2025 года в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 октября 2025 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БЛИНОВ
Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В контексте общей тенденции усложнения горно-геологических условий строительства скважин при задаче получения высоких технико-экономических показателей большое значение приобретают технологии, позволяющие исключить возникновение осложнений.

Одним из наиболее часто встречающихся видов осложнений при бурении, при этом требующих существенных затрат на их ликвидацию, является потеря устойчивости стенок скважины в виде осыпей и обвалов в интервале осыпающихся литифицированных глинистых пород (далее – «ОЛГП»). Несмотря на развитость самой технологии бурения в России и мире, эта проблема все еще продолжает оставаться актуальной.

Все больший интерес инженеров и исследователей в решении проблемы устойчивости ствола скважины в терригенных разрезах вполне обоснованно вызывают катионные полимеры, в том числе полидиаллилдиметиламмоний хлорид (далее – «полиДАДМАХ»). Однако в условиях их относительно низкой изученности в буровой практике появляется необходимость в более глубоком изучении их характеристик, выявлении областей рационального использования.

Разработка новых технологических решений, учитывающих выявленные особенности, позволит повысить эффективность применения катионных полимеров и обеспечить стабилизацию ОЛГП во время бурения.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в развитие научных представлений о процессах, происходящих в потенциально неустойчивых породах, а также в изучение вопросов повышения эффективности буровых работ при проводке скважин в глинистых отложениях внесли Н.Г. Аветисян, О.К. Ангелопуло, Р.Г. Ахмадеев, В.П. Белов, А.И. Булатов, И.Ю. Быков, М.М.Р. Гайдаров, А.Н. Гноевых, В.Д. Городнов, Дж. Грей, Г.С.Г. Дарли, К.Ф. Жигач, Н.И. Крысин, М.Р. Мавлютов, В.Л. Михеев., В.И. Осипов, С.А. Рябоконт, М.К. Сеид-Рза, Н.М. Уляшева, Л.Б. Хузина, З.З. Шарафутдинов, А.К. Яров и многие другие. Аспекты применения катионных

полимеров в составе промывочных жидкостей освещены несопоставимо меньше. Помимо зарубежных авторов, тема их использования в процессе бурения разрабатывалась такими российскими учеными и исследователями как М.М.Р. Гайдаров, А.М. Гайдаров, А.Д. Норов., А.А. Хуббатов, и др.

Объект исследования - составы буровых растворов и технологии их применения при строительстве скважин в интервалах литифицированных глинистых пород.

Предмет исследования - физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии буровых растворов и катионных полимеров в их составе с глинистыми породами.

Цель работы - обеспечение устойчивости ствола скважины в интервалах осыпавшихся литифицированных глинистых пород в процессе ее строительства.

Идея работы заключается в применении в составе буровых растворов катионных полимеров, обеспечивающих устойчивость ствола скважины за счет их повышенной адсорбционной активности к глинистым породам.

Основные задачи исследования:

1. Анализ современных подходов к сохранению устойчивости ствола скважины при бурении в интервалах осыпавшихся литифицированных глинистых пород и выбор наиболее перспективных из них.

2. Исследование эксплуатационных характеристик доступных катионных полимеров как компонентов буровых растворов, выбор и научное обоснование наиболее оптимального варианта полимера для реализации намеченных путей стабилизации литифицированных глинистых пород в рассматриваемых условиях.

3. Разработка технологических решений, основанных на применении выбранного катионного полимера в составе промывочной жидкости при бурении скважин в рассматриваемых условиях.

4. Проведение экспериментальных исследований для оценки эффективности разработанных технологических решений, промысловая апробация и оценка ее результатов.

5. Разработка научно-обоснованных рекомендаций по подготовке ствола скважины, пробуренной с использованием катионных полимеров, к последующему цементированию для обеспечения технологической преемственности.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что последствием несоблюдения условий совместимости полиДАДМАХа и анионных полимеров (ксантана, полианионной целлюлозы) является ухудшение качества отмыва фильтрационной корки при подготовке ствола скважины к креплению.

2. Установлено, что в интервале низких концентраций полиДАДМАХа (≤ 5 г/л) в сравнении с его отсутствием в составе промывочной жидкости в условиях дегидратированного состояния глины наблюдается ускорение проникновения в нее фильтрата бурового раствора и последующего разрушения. Обосновано, что для исключения отрицательного влияния выявленного эффекта на стабильность ствола скважины, снижение концентрации полиДАДМАХа ниже критической не допустимо.

3. Разработан алгоритм управления технологической эффективностью применения катионного полимера полиДАДМАХа в составе безглинистых буровых растворов и соответствующий способ контроля его содержания, основанный на использовании удельной поверхности специально вносимой в систему глинистой фазы в качестве чувствительной измерительной шкалы, путем определения показателя бентонитового эквивалента (E_{BE}) и последующих графических вычислений.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по п. 5 формулы - «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.», а также по п. 7 формулы - «Физико-химические процессы в объёме технологических жидкостей. Составы, свойства и технологии применения технологических жидкостей, химических реагентов для бурения и освоения скважин. Фильтрационные процессы в скважине.».

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании и экспериментальном подтверждении возможности применения полиДАДМАХа в составе безглинистых полимерных буровых растворов для обеспечения устойчивости ствола скважины за счет его повышенной адсорбционной активности к глинистым породам. Кроме того, полученные результаты дополняют имеющиеся теоретические представления об эксплуатационных особенностях полиДАДМАХа и факторах, требующих учета при его применении для вышеобозначенной цели.

Практическая ценность заключается в разработке и внедрении в производственную деятельность следующих методик и процедур:

- экспресс-методики сравнительной оценки влияния среды бурового раствора на стабильность осыпающихся литифицированных глинистых пород (справка о внедрении от 16.06.2021);
- способов подбора условий совместимости пар разнозаряженных полимеров при планировании их использования в составе бурового раствора;
- методики контроля содержания катионного полимера в составе раствора (справка о внедрении от 16.06.2021);
- регламента мероприятий по подготовке ствола скважины, пробуренного с использованием катионных полимеров, к последующему цементированию, направленных на повышение качества крепления (регламент мероприятий от 16.03.2020).

Результаты диссертационного исследования использованы при строительстве скважины месторождения Айракты (акт внедрения от 21.06.2021).

Получены свидетельства экономической эффективности внедренных разработок.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Методология и методы исследований

Работа включала проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований с использованием методов моделирования, наблюдения, выполнения измерений, анализа и синтеза полученных данных. Изучение свойств катионных полимеров, в том числе в составе буровых растворов проводилось с помощью стандартизованных методик, а также принятых в исследовательской практике методов с привлечением приемов титрования, гравиметрии, вискозиметрии, хронометрии и т.д.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение разработанного способа контроля текущего содержания полиДАДМАХа в промывочной жидкости позволяет определять необходимое количество полимера для корректировки его концентрации в процессе бурения.

2. Технология прокачивания порции водного раствора жидкого натриевого стекла после прохождения интервала на буровом растворе, содержащем полиДАДМАХ, позволяет усилить стабилизирующее действие полимера в отношении осыпавшихся литифицированных глинистых пород.

3. Состав и технология применения адгезионного нанокольматанта направленного действия, разработанного на основе катионного полимера полиДАДМАХа, позволяет обеспечить устойчивость стенок ствола скважины при бурении в интервалах осыпавшихся литифицированных глинистых пород.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена методической проработкой и большим объемом экспериментальных исследований, подтверждается хорошей сходимостью и воспроизводимостью полученных результатов, а кроме того, их согласованностью между собой и с данными независимых исследований, а также положительными результатами промысловых испытаний. Достоверность первичных данных, полученных от средств измерений и испытательного оборудования, обеспечивается надлежащей метрологической поддержкой.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных: VIII Международной научно-практической конференции «Практические аспекты нефтепромышленной химии» (г. Уфа, 2018 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2018 г.); Всероссийском конкурсе-акселераторе инновационных проектов «Большая разведка-2019» (г. Пермь, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле-2020» (г. Октябрьский, 2020 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологические решения строительства скважин на месторождениях со сложными геолого-технологическими условиями их разработки» (г. Тюмень, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники-2023» (г. Уфа, 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.). За последние 3 года принято участие в 2 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. Результаты работы обсуждались с представителями нефтедобывающих компаний в рамках рабочего совещания ООО «Газпромнефть-НТЦ» с представителями сервисных компаний (г. Москва, 2018 г.), технического совещания АО «Самотлорнефтегаз» (г. Нижневартовск, 2018 г.), корпоративного акселератора «90-летие Пермской Нефти» ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» (г. Пермь, 2019 г.), а также докладывались на заседаниях кафедры «Нефтегазовые технологии» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в 2018-2021, 2024-2025 гг.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, составлении программы теоретических исследований и экспериментов, проведении основной части экспериментов, анализе и интерпретации полученных данных, разработке технологических и методических решений, составлении инструктивных документов, касающихся порядка реализации

разработанных технологий и методик в реальной производственной деятельности предприятия.

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 15 печатных работ, в том числе 9 – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – «Перечень ВАК»), из них 1 статья в журнале, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus. Получен 1 патент РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, и приложений. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 20 рисунков, 22 таблицы, 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность и глубокую признательность своим научным руководителям: д.т.н., профессору Николаю Ивановичу Крысину и д.т.н., доценту Сергею Евгеньевичу Чернышову за помощь и школу научной работы; а также Юрию Александровичу Кулышеву за ценные советы, замечания и содействие при выполнении данного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общее описание работы, включая обоснование ее актуальности, цель и задачи исследования, выносимые на защиту научные положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе представлен анализ современного состояния вопроса обеспечения устойчивости ствола скважины в интервалах залегания ОЛГП. Определены особенности, предопределяющие нестабильное поведение ОЛГП при бурении, целевая стратегия их стабилизации, подтверждена перспективность применения катионных полимеров в составе буровых растворов (далее – «БР») для реализации выбранной стратегии. Проведен предварительный отбор наиболее подходящих из доступных катионных полимеров на основании анализа их химического строения.

Во второй главе описаны применяемые в работе методики, изложены результаты изучения эксплуатационных свойств выбранных катионных полимеров как компонентов БР. Разработана экспресс-методика сравнительной оценки влияния среды БР на стабильность ОЛГП. Обосновывается выбор катионного полимера для реализации цели исследования в пользу полиДАДМАХа. Приводятся результаты исследования его совместимости с анионными полимерами БР (ксантаном, полианионной целлюлозой). Разработаны быстрые способы поиска условий совместимости. Исследованы последствия несоблюдения условий совместимости полиДАДМАХа и анионных полимеров для качества отмыва фильтрационной корки при подготовке ствола скважины к креплению, а также для проходимости ситовых панелей вибросит.

В третьей главе описаны ход и результаты разработки технологических решений, связанных с применением выбранного КП в составе БР для стабилизации ОЛГП. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по подготовке ствола скважины, пробуренной с использованием КП, к последующему цементированию для обеспечения технологической преемственности.

В четвертой главе приведены результаты промысловых испытаний в составе полимерного БР разработанного адгезионного нанокольматанта направленного действия АННД (далее – «АННД») при строительстве эксплуатационной скважины на месторождении Айракты в Казахстане. Оценен полученный, а также возможный совокупный экономический эффект от его применения. Выполнена оценка экономического эффекта от внедрения других разработанных технологических и методических решений.

В заключении кратко изложены основные результаты, полученные в ходе решения поставленных задач.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение разработанного способа контроля текущего содержания полиДАДМАХа в промывочной жидкости позволяет определять необходимое количество полимера для корректировки его концентрации в процессе бурения.

Определено, что наиболее характерными особенностями, предопределяющими нестабильное поведение ОЛГП при бурении, являются: дегидратированное состояние и наличие между глинистыми элементами преимущественно метастабильных контактов переходного типа, в которых при гидратации легко преодолеваются силы сцепления, что ведет к ослабеванию связи между частицами при увлажнении фильтратом БР и разупрочнению породы; хрупкий характер разрушения; наличие ориентированной микроструктуры (трещиноватости и сланцеватости), обуславливающей анизотропию сил сцепления в массиве породы.

По результатам обзора научно-технической информации установлено, что все результативные подходы к стабилизации ОЛГП, связанные с составом и свойствами применяемого БР, представляют собой комплексные стратегии, которые можно разложить на одни и те же общие базовые элементы: 1) снижение гидратационной активности дисперсионной среды БР; 2) снижение темпов проникновения фильтрата БР в капилляры и микротрещины горной породы; 3) усиление сил сцепления между агрегатами в массиве породы. Таким образом, совокупная реализация этих трех элементов была выбрана в качестве основной стратегии, выполнение которой должно обеспечиваться разрабатываемой технологией.

Рабочая гипотеза заключалась в том, чтобы стабилизировать ОЛГП напрямую или опосредованно через адсорбционное воздействие катионных полимеров, движущим фактором которого является их сродство к отрицательно заряженной поверхности, свойственной большинству глинистых минералов в щелочной и нейтральной средах. На основании особой важности адсорбционной активности катионных полимеров для стабилизации ОЛГП, а также их высокого сродства к глинистым частицам вообще, был сделан вывод о нецелесообразности ввода катионных полимеров в состав глинистых растворов. Поскольку в таком случае их адсорбционный потенциал будет растрочен на взаимодействие с глинистой фазой самого БР. Поэтому рациональная область применения разрабатываемой технологии была ограничена условно-безглинистыми (далее – «безглинистыми») полимерными БР.

Показано, что наиболее подходящим из доступных катионных полимеров для целей разработки является полиДАДМАХ (далее – «КП»). Экспериментально подтверждены его преимущества, заключающиеся в ярко выраженных ингибирующих и инкапсулирующих (обволакивающих) свойствах, за счет чего эффективно снижается гидратационная активность дисперсионной среды и темпы ее проникновения вглубь глинистого образца, имитирующего фрагмент ОЛГП, что также способствует усилению сил сцепления между отдельными агрегатами в массиве образца. Установлено, что надежная стабилизация образцов, имитирующих фрагмент ОЛГП, достигается при содержании КП от 15 до 20 г/л. Большая концентрация нецелесообразна вследствие выхода стабилизирующего эффекта на плато.

Таким образом, простейшим искомым решением поставленной цели является прямое использование полиДАДМАХа в качестве самостоятельной добавки в безглинистый полимерный БР, поскольку за счет адсорбции на поверхности глинистой породы он способен реализовать все три обязательных элемента выбранной стратегии. При этом, с учетом выявленных в исследовании ограничений, необходимо соблюдать следующие важные условия: поддерживать минерализацию полимерного БР, обеспечивающую совместимость КП с анионными полимерами, несколько выше минимального предела с целью предотвращения взаимной потери растворимости разнозаряженных полимеров при ситуационном снижении концентрации соли; с этой же целью промывка ситовых панелей вибросит пресной водой должна быть запрещена; для обеспечения надежного стабилизирующего действия КП в отношении ОЛГП его концентрация во время бурения проблемного интервала должна быть не менее 15 г/л.

Вместе с тем показано, что в интервале низких концентраций (≤ 5 г/л) КП в сравнении с его отсутствием в растворе способен оказывать отрицательный эффект на стабильность глинистой породы, выражающийся в ускорении проникновения дисперсионной среды вглубь глинистого образца и интенсификации его последующего разрушения. Установлено, что эффект обусловлен катионной природой полимера и проявляется только в отношении

дегидратированных образцов, имитирующих ОЛГП. В связи с этим имеется основание полагать, что при низких концентрациях КП в процессе бурения в интервалах ОЛГП будет наблюдаться более интенсивное продвижение фильтрата вглубь стенки скважины и расклинивающее действие такого проникновения. Это будет провоцировать осыпи и обвалы (если рассматривать протекание процесса в массиве породы), а также диспергирование шлама (если рассматривать протекание процесса в выбуренных частицах) и рост плотности раствора вследствие форсированной наработки мелкодисперсной твердой фазы. Таким образом, для исключения отрицательного влияния выявленного эффекта на стабильность ствола скважины, снижение концентрации КП в БР во время бурения проблемного интервала ниже критической не допустимо.

Принимая во внимание высокую адсорбционную активность КП и большую удельную поверхность поступающего в раствор глиносодержащего шлама, определено, что наиболее рациональным алгоритмом управления технологической эффективностью КП является его ввод в циркулирующий раствор непосредственно перед началом бурения проблемного интервала, последующий постоянный мониторинг текущего содержания в растворе активных молекул/сегментов полимера, еще не реализовавших свой адсорбционный потенциал, и необходимая коррекция в виде поддерживающих обработок.

Разработан соответствующий способ и методика контроля, основанные на использовании удельной поверхности специально вносимой в систему глинистой фазы в качестве чувствительной измерительной шкалы и последующем определении показателя бентонитового эквивалента E_{BE} (измеряемого по ГОСТ 33213-2014 по адсорбции метиленовой сини). На рисунке 1а представлен результат построения калибровочного графика зависимости изменения E_{BE} с увеличением концентрации в системе препарата КП. Очевидно, что для целей методики рационально использовать линейную область (область I) полученной зависимости. Рисунок 1б иллюстрирует способ использования графика. Разработанный способ позволяет определять необходимое количество полимера для корректировки его концентрации в процессе бурения, минимизирует возможность

проявления выявленного негативного эффекта, связанного с интенсификацией проникновения дисперсионной среды вглубь неустойчивой глинистой породы при невысоких концентрациях КП.

2. Технология прокачивания порции водного раствора жидкого натриевого стекла после прохождения интервала на буровом растворе, содержащем полиДАДМАХ, позволяет усилить стабилизирующее действие полимера в отношении осыпающихся литифицированных глинистых пород.

При применении полиДАДМАХа в составе безглинистых полимерных БР для стабилизации ОЛПП сами каналы продвижения фронта фильтра остаются не заблокированными, а лишь экранированными плотной сеткой адсорбировавшихся молекул КП. А поскольку с продвижением фильтра вглубь толщи породы концентрация свободных от адсорбционных взаимодействий молекул КП будет непрерывно уменьшаться, то на каком-то участке неизбежно достигнет значений, меньше допустимых, при которых возможно протекание описанного негативного эффекта. В связи с этим возникла необходимость разработки более сложных технологических решений, способных повысить надежность стабилизирующего действия КП, исключаящих возможность проявления негативного эффекта. Определено, что поиск таких решений необходимо вести в направлении борьбы с перезарядкой поверхности глинистой породы, а также усиления блокирования каналов, по которым возможно продвижение фильтра в ее толщу.

В качестве варианта, обеспечивающего действие сразу по этим двум направлениям, было предложено тандемное использование КП и жидкого натриевого стекла (ЖС). При этом КП, представляющий собой поликатион, выступает как место связывания силикат-анионов, при ассоциации с которыми его заряд нейтрализуется. С другой стороны, являясь полиэлектролитом, КП способен катализировать процесс их поликонденсации (рисунок 2). Важно, что образующийся в результате этой необратимой реакции продукт является водонерастворимым. Поэтому стенка скважины, а также просвет микротрещин и каналов, которые после вскрытия интервала на БР с добавкой КП будут покрыты выступающими во внешнюю среду положительно заряженными петлями молекул КП, окажутся

защищенными непроницаемым экраном. Сформировавшийся экран будет не только блокировать пути продвижения фильтрата БР вглубь породы, но и обеспечивать прочную физическую связь соседних частиц породы между собой (крепящий эффект).

Эффективность решения была подтверждена экспериментально на модельных образцах, имитирующих ОЛГП. Содержание отдельных этапов реализации технологии, а также внешний вид образцов представлены в таблице 1. Как видно из результатов, наибольшую стабильность сохранили образцы, подвергшиеся тандемному воздействию КП и ЖС. Таким образом, технология прокачивания порции водного раствора ЖС после прохождения интервала на БР, содержащем КП, позволяет усилить стабилизирующее действие полимера в отношении ОЛГП.

Преимущества технологии заключаются в относительной простоте, а также возможности ее использования для аварийного реагирования на скважинах с уже возникшими осложнениями, изначально пробуренных без использования КП. Разработанная для таких случаев схема стабилизации ОЛГП представлена на рисунке 3.

3. Состав и технология применения адгезионного нанокольматанта направленного действия, разработанного на основе катионного полимера полиДАДМАХа, позволяет обеспечить устойчивость стенок ствола скважины при бурении в интервалах осыпавшихся литифицированных глинистых пород.

В качестве другого технологического решения, основанного на применении выбранного КП в составе БР, в направлении усиления блокирования каналов продвижения фильтрата в толщу глинистой породы был разработан новый тип реагентов (патент РФ №2691795). Концепция предложенных адгезионных кольматантов направленного действия эксплуатирует 2 важных свойства молекулы КП:

1) необратимость его адсорбционного взаимодействия с глинистой породой;

2) дифильность молекулы КП, обуславливающая возможность его прочного адсорбционного взаимодействия как с гидрофильными (за счет электростатических сил), так и с гидрофобными (за счет гидрофобных взаимодействий) микро- и нано-частицами. Такое взаимодействие приводит к формированию стабильного ассоциата.

В результате этого КП выступает в качестве матрицы-носителя и, обладая специфическим сродством к глинистым породам, обеспечивает, прочное адгезионное зацепление кольматирующих частиц на поверхности и в просветах каналов глинистой породы (направленное действие). За счет этого один из элементов комплексной стратегии стабилизации ОЛГП, связанный с обеспечением снижения проникновения фильтрата в капилляры и микротрещины горной породы, будет многократно усилен. При этом, оставаясь полимерной макромолекулой, физико-химические свойства которой на участках, не взаимодействующих с кольматирующими частицами, сохраняются, КП не утрачивает способности реализовывать 2 других элемента стратегии, снижая гидратационную активность дисперсионной среды БР и усиливая силы сцепления между агрегатами в массиве глинистой породы.

Принципиальная схема работы адгезионных кольматантов направленного действия приведена на рисунке 4. В таблице 2 приведены результаты оценки эффективности стабилизирующего действия ассоциатов в сравнении с отдельными компонентами относительно модельных образцов, имитирующих ОЛГП. Данные свидетельствуют о синергетическом действии компонентов в составе ассоциата, позволяющем существенно продлить (п. 6-8) время стабильного состояния образцов. Определено, что для наибольшей эффективности фракционный состав кольматирующих частиц должен лежать в наноразмерном диапазоне (таблица 3), а их концентрация по отношению к КП не должна быть высокой.

Показано, что относительно адгезионных кольматантов на основе ПАВ преимущества разработанного адгезионного нанокольматанта направленного действия (АННД) заключаются в следующем: защитный экран формируется мгновенно и прочно удерживается на поверхности защищаемой породы; наночастицы прочно связаны с матрицей и не способны проникать вглубь породы, что исключает риски загрязнения продуктивного пласта; матрица на основе КП снижает гидратационную активность дисперсионной среды БР и усиливает силы сцепления между агрегатами в массиве глинистой породы. Преимущество перед адгезионными

кольматантами на основе ПАВ подтверждено экспериментально на примере коммерческого реагента (таблица 4).

Результаты лабораторных испытаний АННД в составе различных рецептур БР показали его работоспособность в диапазоне температур, плотностей, степени и типа минерализации.

Проведены промысловые испытания АННД в составе полимерного БР при строительстве эксплуатационной скважины №107 на месторождении Айракты в Казахстане. Ввод добавки в БР проводился с целью исключения возможного осыпания литифицированных глинистых пород нижнего карбона общей мощностью 650 м в интервале бурения под эксплуатационную колонну. В результате испытаний отмечено отсутствие проблем, связанных с отклонением параметров БР от проектных, а также отсутствие признаков осложнений, связанных с неустойчивостью ствола скважины в интервале ОЛГП. Экономический эффект от применения технологии на опытной скважине составил 250 тыс. руб. Показано, что в общем случае совокупный экономический эффект от применения АННД в зависимости от сложности объекта строительства и других значимых факторов может составлять до 15-20 млн. руб. на одну скважину.

Таким образом, состав и технология применения адгезионного нанокольматанта направленного действия, разработанного на основе катионного полимера полиДАДМАХа, позволяет обеспечить устойчивость стенок ствола скважины при бурении в интервалах осыпающихся литифицированных глинистых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи обеспечения устойчивости ствола скважин в интервалах осыпающихся литифицированных глинистых пород применением катионных полимеров в составе бурового раствора, имеющей важное значение для развития технологии строительства скважин.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Определена целевая стратегия стабилизации ОЛГП, заключающаяся в комплексной реализации следующих элементов:

снижение гидратационной активности дисперсионной среды бурового раствора и темпов ее проникновения в капилляры и микротрещины горной породы, усиление сил сцепления между агрегатами в массиве породы.

2. Показано, что из доступных катионных полимеров наиболее релевантны выбранной стратегии эксплуатационные свойства полиДАДМАХа, надежное стабилизирующее действие которого достигается при концентрации от 15 до 20 г/л. Установлен ряд ограничений при его использовании для заданных целей в составе полимерных буровых растворов: проявление полимером обратного дестабилизирующего действия при концентрациях ≤ 5 г/л, а также необходимость учета условий совместимости с анионными полимерами при работе системы очистки и подготовки ствола скважины к креплению. Разработаны быстрые способы поиска этих условий.

3. Выработано несколько технологических решений, основанных на применении полиДАДМАХа в составе безглинистых полимерных буровых растворов с учетом выявленных в исследовании рисков. Разработан алгоритм управления эффективностью работы полимера, предполагающий постоянный мониторинг текущего содержания в растворе его нереализовавших адсорбционный потенциал молекул и сопутствующую коррекцию в виде поддерживающих обработок, а также соответствующий способ и методика контроля, основанные на определении показателя бентонитового эквивалента. Разработан способ повышения устойчивости стенок ствола скважины путем tandemного использования полиДАДМАХа и жидкого натриевого стекла, эксплуатирующий реакцию их взаимного отверждения. Разработан новый тип адгезионных кольматантов на основе предустановленных на носителе (матрице) направленного действия наночастиц, позволяющих стабилизировать ствол скважины в интервале ОЛГП, где роль матрицы выполняет полимерная молекула полиДАДМАХа.

4. Эффективность разработок подтверждена экспериментально, а также в буровой практике. Технология адгезионного нанокольматанта направленного действия успешно прошла промысловые испытания при строительстве скважины №107

месторождения Айракты. Полученный экономический эффект составил 250 тыс. руб. Методические решения, включая алгоритм управления эффективностью работы катионного полимера, реализуются на объектах ПАО «Газпром нефть» и ПАО «ЛУКОЙЛ» в Западно-Сибирском регионе. В общем случае в зависимости от сложности объекта строительства и масштаба возможных осложнений совокупный экономический эффект от разработанного комплекса технологий может составить 15-20 млн. руб. на одну скважину.

5. Показано, что игнорирование условий совместимости полиДАДМАХа с анионными полимерами негативно влияет на качество подготовки ствола скважины к цементированию. Для обеспечения технологической преемственности разработаны научно-обоснованные рекомендации по подготовке ствола скважины для типовой схемы применения буферных составов.

Перспективы дальнейшего развития исследований в области стабилизации осыпающихся литифицированных глинистых пород применением катионных полимеров в составе буровых растворов автор связывает с молекулярной инженерией катионных сополимеров для оптимизации их отдельных эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях перечня ВАК:

1. Ульянова, З. В. Моделирование процесса дестабилизации аргиллитов в среде исследуемой промывочной жидкости: обоснование элементов и оценка состоятельности модели / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев, Н. И. Крысин // Инженер-нефтяник. – 2018. – № 4. – С. 16-21.

2. Ульянова, З. В. К вопросу о перспективах применения катионных реагентов в технологии строительства скважин / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев, Н. И. Крысин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 2. – С. 23-28.

3. Ульянова, З. В. Технология получения нового типа кольматантов, предусмотренных на носителе направленного

действия / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев, Н. И. Крысин // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2019. – № 2. – С. 32-35.

4. Ульянова, З. В. О необходимости и возможностях контроля содержания катионных полимеров в промывочной жидкости во время бурения / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 4 (616). – С. 60-63.

5. Ульянова, З. В. Изучение условий совместимости некоторых полимерных компонентов в составе бурового раствора / З. В. Ульянова // Наука и техника в газовой промышленности. – 2020. – № 2 (82). – С. 43-49.

6. Ульянова, З. В. О возможном отрицательном влиянии катионных полимеров на стабильность ствола скважины в глинистых породах / З. В. Ульянова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 8. – С. 35-40.

7. Ульянова, З. В. Повышение качества цементирования нефтегазовых скважин, пробуренных с использованием катионных полимеров / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев, Н. И. Крысин // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2021. – № 1. – С. 9-13.

8. Ульянова, З. В. Научно-обоснованное управление эксплуатационными характеристиками катионных буровых растворов как технологическая основа их эффективности для повышения технико-экономических показателей буровых работ / З. В. Ульянова, Ю. А. Кулышев, С. Е. Чернышов // Инженер-нефтяник. – 2024. – № S5. – С. 103-107.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

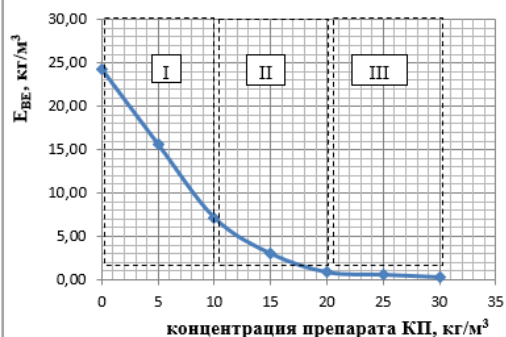
9. Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов / С.Е. Чернышов, В.И. Галкин, З.В. Ульянова, Дэвид Иаин Макферсон Макдоналд// Записки Горного института. - 2020. - Т. 242. - С. 179-190. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.179.

Патент:

10. Патент № 2691795 РФ, МПК C09K 8/035 (2006.01). Адгезионная кольматирующая добавка для бурового раствора (варианты): № 2018132083 : заявл. 07.09.2018 : опубл. 18.06.2019 / Кулышев Ю. А., Ульянова. З. В. ; заявитель и патентообладатель АО Науч.-исслед. центр «Энергоресурс». – Бюл. № 17. – 8 с.

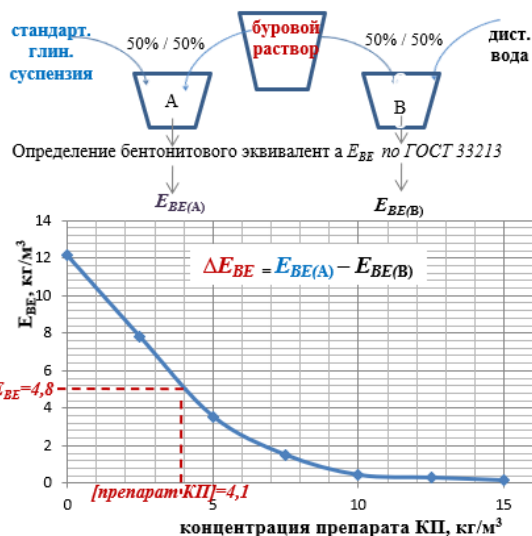
Построение калибровочного графика

	Концентрация препарата КП в составе стандартизованной глинистой суспензии, кг/м ³						
	0	5	10	15	20	25	30
Бентонитовый эквивалент E_{BE} , кг/м ³	24,3	15,6	7,1	3,0	0,9	0,6	0,3



а

Использование калибровочного графика



б

Рисунок 1 – Результат построения (а) и способ использования (б) калибровочного графика для оценки достаточности содержания КП в буровом растворе

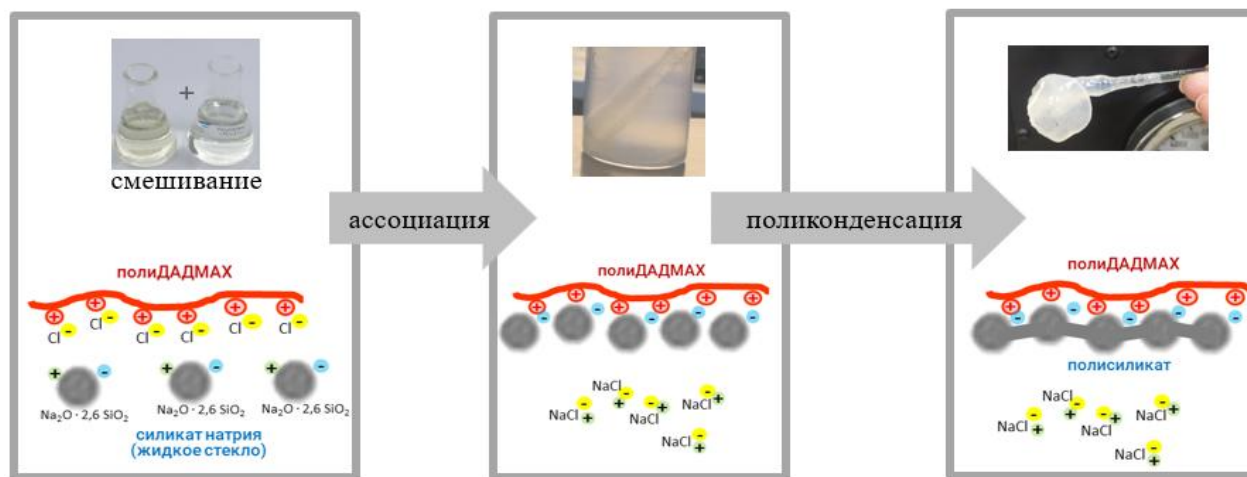
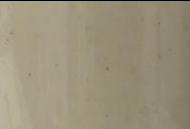


Рисунок 2 - Образовавшийся продукт ассоциации силикат-ионов с КП и их последующей поликонденсации

Таблица 1 – Результаты оценки эффективности технологии прокачивания порции водного раствора ЖС после прохождения интервала на БР, содержащем КП, для стабилизации ОЛГП

Моделируемый этап реализации технологии (время воздействия в эксперименте)	Варианты		
	При бурении проблемного интервала в буровой раствор КП не добавляется. После бурения проблемного интервала раствор ЖС не прокачивается	При бурении проблемного интервала в буровой раствор КП добавляется. После бурения проблемного интервала раствор ЖС не прокачивается	При бурении проблемного интервала в буровой раствор добавляется КП. После бурения проблемного интервала прокачивается раствор ЖС
	Внешний вид образцов после прохождения соответствующего этапа		
Адсорбция КП на поверхность глинистой породы в ходе бурения проблемного интервала (2 часа)	(этап проведен без добавления КП в буровой раствор) 		
Прокачка технологической пачки водного раствора ЖС (1 минута)	- (этап отсутствует)	- (этап отсутствует)	
Дальнейшее бурение и промывка скважины до спуска обсадной колонны и ее крепления (6 часов)			
	Загрязнение бурового раствора продуктами разрушения образцов после прохождения этапа		
			
Примечание: - Этапы реализации технологии моделировались в ходе теста на эрозионную устойчивость глинистых образцов в динамической среде полимерного БР в ячейках старения. Моделирование прокачки водного раствора ЖС осуществлялось погружением в соответствующий раствор отброшенных на сито образцов и взбалтыванием для обеспечения интенсивной промывки. Для сравнения в эксперимент включили вариант, моделирующий случай бурения проблемного интервала с использованием КП, но при этом не предполагающий последующей прокачки пачки с ЖС, а также случай, когда бурение интервала ведется без использования КП вообще. - концентрация КП в буровом растворе в вариантах 2 и 3 составила 10 г/л; - концентрация ЖС в водном растворе при имитации прокачивания технологической пачки составила 30 г/л.			

ПРИ ПОЯВЛЕНИИ ПЕРВЫХ ПРИЗНАКОВ ОСЫПЕОБРАЗОВАНИЯ:

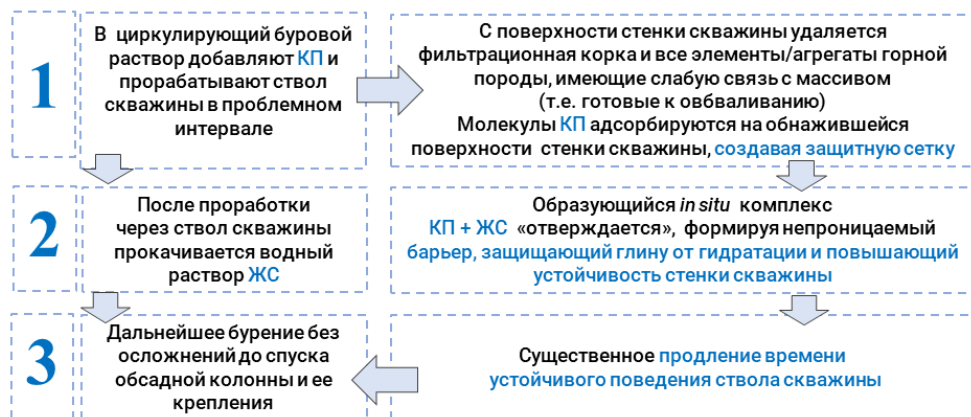
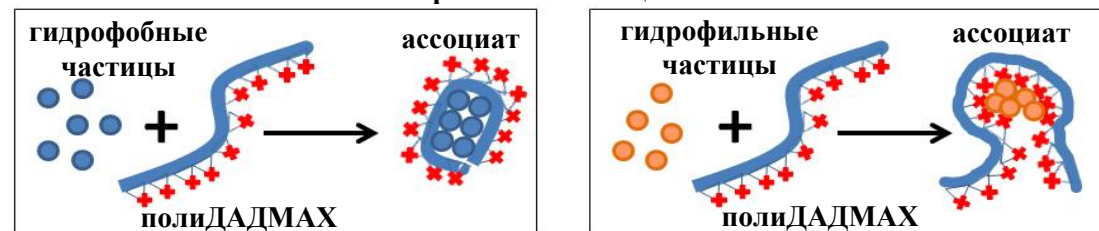
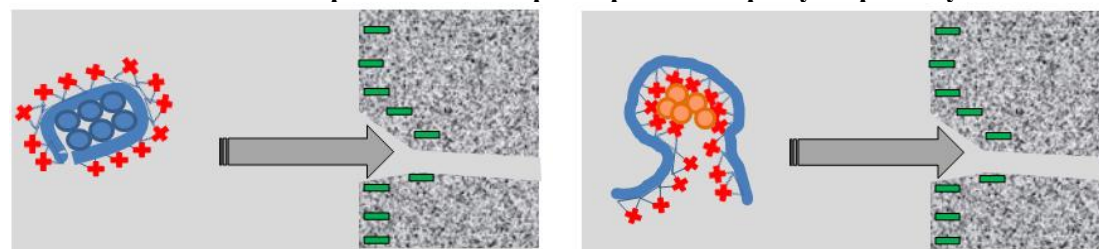


Рисунок 3 – Схема стабилизации уже пробуренных интервалов с помощью технологии тандемного использования КП и ЖС

I Образование ассоциата



II Свободное проникновение фильтрата в открытую трещину



III Блокирование проникновения фильтрата адсорбированным в просвете трещины ассоциатом

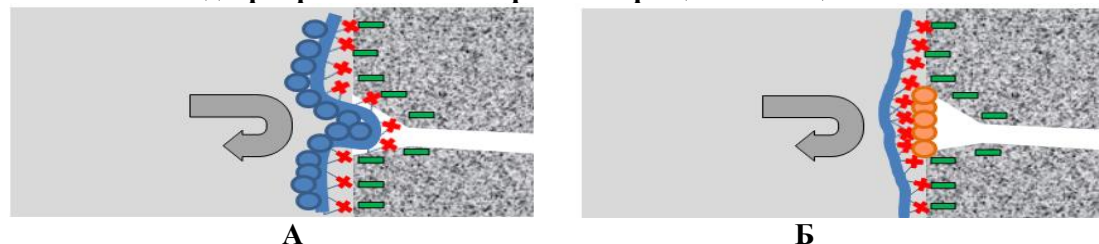


Рисунок 4 – Схема формирования адгезионного колюматанта на основе КП и его блокирующего действия в составе бурового раствора: для случаев использования гидрофобных (А) и гидрофильных (Б) частиц

Таблица 2 – Результаты оценки эффективности стабилизирующего действия ассоциатов в сравнении с отдельными компонентами

№ п/п	Состав исследуемой среды	Показатели эффективности	
		T_{II} , мин-с	T_O , мин-с
1	100 г/л KCl	1-40	0-00
2	100 г/л KCl + 10 г/л КП	6-00	7-50
3	100 г/л KCl + 5 г/л диоксид кремния	2-00	0-10
4	100 г/л KCl + 5 г/л сульфированный асфальт	2-30	0-20
5	100 г/л KCl + 5 г/л технический углерод	*	*
6	100 г/л KCl + (10 г/л КП + 5 г/л диоксид кремния)**	9-30	12-10
7	100 г/л KCl + (10 г/л КП + 5 г/л сульфированный асфальт)**	7-40	11-00
8	100 г/л KCl + (10 г/л КП + 5 г/л технический углерод)**	8-20	12-40
Примечание: T_{II} - время пропитки образца; T_O - время начала осыпания образца; * - компонент не солнобилизируется в водном растворе; ** - перед добавлением компоненты предварительно смешивались в отдельной емкости для формирования ассоциата.			

Таблица 3 – Результаты оценки влияния размера коагулирующих частиц в составе ассоциата на эффективность действия адгезионного коагулянта

Состав исследуемой среды	Показатели эффективности	
	T_{II} , мин-с	T_O , мин-с
100 г/л KCl + 10 г/л КП	6-30	7-20
100 г/л KCl + (10 г/л КП + 10 г/л гидрофобный мел М-60Г D99 $\approx$ 10 мкм)	8-10	9-40
100 г/л KCl + (10 г/л КП + 10 г/л гидрофобный мел М-90Г D99 $\approx$ 5 мкм)	9-20	11-00
100 г/л KCl + (10 г/л КП + 10 г/л диоксид кремния D99 $\approx$ 40 нм)	10-10	12-20
Примечание: T_{II} - время пропитки образца; T_O - время начала осыпания образца.		

Таблица 4 – Результаты сравнительной оценки эффективности адгезионных коагулянтов

Показатель	АННД	Адгезионный коагулянт на основе ПАВ
Степень эрозии образцов в среде модельного биополимерного хлоркалиевого бурового раствора с добавкой адгезионного коагулянта		