

На правах рукописи



Хвоцин Павел Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНВЕРТНОГО ЭМУЛЬСИОННОГО
РАСТВОРА НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ
ПРОМЫВКИ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ БУРЕНИЯ**

Специальность 25.00.15 - Технология бурения и освоения скважин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2016

Работа выполнена на кафедре «Бурение нефтяных и газовых скважин» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и в управлении проектирования и мониторинга строительства скважин филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

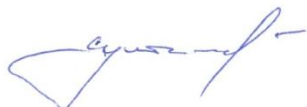
| | |
|-------------------------------|--|
| Научный руководитель | доктор технических наук, профессор Конесев Геннадий Васильевич |
| Официальные оппоненты: | Гайдаров Миталим Магомед-Расулович доктор технических наук, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» / лаборатория крепления и закачивания скважин центра разработки и эксплуатации газовых и нефтегазовых месторождений, начальник |
| | Валиева Оксана Ивановна кандидат химических наук, ООО «БашНИПИнефть» / лаборатория буровых и цементных растворов, заведующий |
| Ведущая организация | ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет» |

Защита состоится « 6 » октября 2016 г. в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан « » 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

В настоящее время, ввиду истощения большинства залежей нефти и газа, начинают активно разбуриваться новые месторождения, которые разрабатываются скважинами сложного профиля, наклонно-направленными скважинами с большой протяженностью горизонтальных участков для повышения площади контакта с продуктивным пластом. Кроме того, на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки, для вовлечения продуктивных объектов, которые ранее считались нерентабельными, в том числе по причине высоких рисков осложнений и отсутствия эффективных технологий бурения, появилась необходимость строительства глубоких скважин (наклонных, горизонтальных, многоствольных), бурение которых затрудняется сложными горно-геологическими и термобарическими условиями.

Для успешной проводки ствола скважин со сложным профилем в этих условиях наиболее предпочтительным решением является применение инвертно-эмульсионных растворов (ИЭР), которые обладают рядом преимуществ перед растворами на водной основе: инертностью по отношению к неустойчивым глинистым и соленосным отложениям, низкой диспергирующей способностью в отношении выбуренной породы, высокими смазочными и антикоррозионными свойствами, устойчивостью к кальциевой и сероводородной агрессиям, низким влиянием на коллекторские свойства продуктивного пласта. Однако, применительно к ИЭР актуальной остается задача оптимизации их технологических свойств с целью повышения устойчивости ствола, эффективности очистки скважин и снижения гидравлических сопротивлений в элементах КНБК и в затрубном пространстве, а также решение проблемы стабилизации реологических, структурно-механических и фильтрационных показателей свойств ИЭР с традиционным рецептурным составом в условиях повышенных температур.

Наличие указанных проблем свидетельствует о том, что для сохранения ИЭР в арсенале эффективных средств современного бурения, наряду со снижением их токсичности при одновременном совершенствовании технологии примене-

ния и решении проблем утилизации и захоронения отходов, необходимо совершенствование состава и технологических параметров эмульсионных растворов, в особенности реологических характеристик.

Цель работы

Совершенствование рецептур инвертных эмульсионных растворов для бурения скважин сложного профиля использованием комплексной добавки на основе синтетического латекса и диоксановых спиртов, позволяющей стабилизировать реологический профиль растворов в условиях высоких температур.

В диссертации решались следующие **задачи**:

1 Анализ технологий в области применения и регулирования реологических показателей инвертных эмульсионных растворов.

2 Обоснование выбора методов исследования технологических свойств инвертных эмульсионных растворов.

3 Теоретическое и экспериментальное обоснование выбора композиции реагентов для регулирования реологического профиля инвертно - эмульсионных растворов, в том числе в условиях высоких температур.

4 Исследование и разработка рецептур инвертно - эмульсионных растворов на основе термопластичной композиции для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях.

5 Проведение промысловых испытаний и оценка промышленной эффективности разработанных рецептур инвертно - эмульсионных промывочных жидкостей.

Научная новизна

1 Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ повышения термостойкости, стабилизации реологических и структурно-механических свойств инвертно-эмульсионных растворов за счет создания условий для формирования трехмерных сеток из макромолекул комплексных соединений синтетического латекса и диоксановых спиртов в объеме дисперсионной среды раствора.

2 Установлено, что показатель эрозии пород тимано-саргаевских аргиллитовых отложений снижается при использовании в качестве дисперсной фазы

эмульсии вместо пресной воды насыщенных растворов CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KCl , MgCl_2 в 2,7; 2,4; 1,4; 1,1 раза, соответственно.

Теоретическая значимость и практическая ценность

1 Разработана термопластичная композиция на основе синтетического латекса и диоксановых спиртов, сохраняющая показатели реологических свойств инвертно-эмульсионных растворов в рабочем диапазоне при температурах до 150°C , в частности добавка композиции в раствор позволяет при увеличении температуры от 25 до 150°C увеличивать показатель СНС на 73% (с 56 до 97 дПа), показатель ДНС – на 27% (со 183 до 233 дПа).

2 Разработанные рецептуры инвертно-эмульсионных растворов использовались при бурении 143 горизонтальных скважин Пермского края и 1 горизонтальной скважины Ненецкого автономного округа с положительным технико-экономическим эффектом.

3 Технология бурения скважин сложного профиля с использованием разработанной рецептуры ИЭР принята к внедрению на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

4 Разработанная технология активно используется филиалом «ПермНИПИ-нефть» при составлении проектно-сметной документации – групповых рабочих проектов и индивидуальных программ на строительство и реконструкцию скважин.

5 Разработана и утверждена в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» «Инструкция по технологии приготовления, применению и регулированию параметров буровых растворов» (г. Пермь, 2012 г.).

6 Разработан и утвержден в ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ» «Регламент по технологии приготовления и применению эмульсионного бурового раствора для бурения горизонтальных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ» (г. Пермь, 2014 г.).

7 Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе УГНТУ по направлению «Нефтегазовое дело» при изучении дисциплин: «Буровые промывочные жидкости», «Технология промывки скважин в осложненных

условиях», «Промывочные жидкости и промывка скважин в сложных горно-геологических условиях», «Регулирование свойств технологических жидкостей для вскрытия продуктивного пласта».

Методология и методы исследований

Методология исследований заключалась в поэтапном изучении технологических показателей свойств инвертно-эмульсионных растворов (реологических, фильтрационных, электростабильности и др.) при нормальных и повышенных температурах и давлениях, а также изучение специальных свойств инвертно-эмульсионных растворов (ингибирующих, кинетических, смазочных, антифрикционных, гидрофобизирующих и т.д.). При решении поставленных задач были использованы методы планирования эксперимента. Для проведения экспериментальных исследований применялись стандартные методы определения механических свойств, твердости и микроструктуры металла; обработку результатов экспериментов проводили с использованием методов математической статистики.

Основные защищаемые положения

1 Обоснование состава и технологии применения термопластичной композиции на основе синтетического латекса и диоксановых спиртов (Патент РФ №2467049).

2 Результаты экспериментальных исследований рецептур инвертно-эмульсионных растворов на основе разработанной термопластичной композиции при различных объемных температурах раствора.

3 Результаты промысловых испытаний разработанных рецептур инвертно-эмульсионных растворов при строительстве горизонтальных скважин на месторождениях Пермского края и Ненецкого автономного округа (с суммарным экономическим эффектом около 186 млн. рублей).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения широко апробированных, а также оригинальных методов и методик экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: I научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (г. Москва, 2011 г.); XV Международной научно-практической конференции «Эфиры целлюлозы и крахмала, другие новые химические реагенты и композиционные материалы как основа успешного сервиса и высокого качества технологических жидкостей для строительства, эксплуатации и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин» (г. Суздаль, 2011 г.); Технической конференции «Новые технологии при разработке и эксплуатации месторождений. От теории к практике» (г. Тюмень, 2013 г.); VIII Всероссийской научно-практической конференции «Нефтепромысловая химия» (г. Москва, 2013 г.); Международной технической нефтегазовой конференции и выставке SPE по разведке и добыче (г. Москва, 2014 г.). Результаты исследований диссертационной работы неоднократно докладывались на Ученом совете Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» (г. Пермь), научно-техническом совете ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» (г. Пермь, 2011-2014 г.г.), на кафедре бурения УГНТУ (г. Уфа, 2013-2016 г.г.).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ, получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, общим объемом 209 страниц печатного текста. Список литературы состоит из 158 наименований. Работа включает 43 таблицы, 37 рисунков и 5 приложений.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность за помощь научному руководителю д.т.н., профессору Г.В. Конесеву, а также проректору по научной и инновационной работе УГНТУ, д.т.н., профессору Р.А. Исмакову; специалистам ОТСС филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми к.т.н. И.Л. Некрасовой и к.т.н. О.В. Гаршиной за полезные консультации, советы и помощь при выполнении данной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, изложены цель и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы и обзор исследований в области разработки и применения растворов на углеводородной основе при бурении скважин сложного профиля в различных геологических условиях. По результатам обзора научно-технической информации выявлено, что большинство горизонтальных скважин со сверхдальним отклонением от вертикали пробурено с использованием ИЭР. Применение ИЭР позволяет уменьшать коэффициенты трения в парах «металл-металл», «порода-металл» и «металл-фильтрационная корка», сокращать энергозатраты при спуско-подъемных операциях (СПО), повышать механическую скорость бурения и работоспособность долот, обеспечивать устойчивость ствола скважины за счет исключения гидратации, набухания и разупрочнения терригенных пород, максимально сохранять коллекторские свойства продуктивных пластов на этапе бурения. Однако, несмотря на множество успешных примеров использования ИЭР при строительстве скважин сложного профиля, в исследованиях отечественных и зарубежных авторов отмечены проблемы, связанные с регулированием технологических свойств таких растворов, в особенности реологических параметров при существенном утяжелении растворов твердой фазой (инертными добавками) и при изменении температуры. Самым существенным негативным фактором, характерным для ИЭР с традиционным рецептурным составом, является сильное падение вязкости, динамического и статического напряжения сдвига растворов при увеличении температуры, что приводит к заметному ухудшению качества очистки ствола горизонтальных скважин, осаждению шлама и утяжелителя, росту коэффициента трения, возникновению затяжек и посадок инструмента, прихватов (в том числе дифференциальных). Для решения данной проблемы необходимо, во-первых, производить тщательный подбор углеводородной основы, водомасляного отношения и эмульгатора для раствора, во-вторых, использовать технологии стабили-

зации реологического профиля раствора за счет ввода добавок, которые увеличивают вязкость углеводородных жидкостей с ростом температуры.

Значительный вклад в исследование свойств эмульсионных промывочных растворов и решение проблем, связанных с их применением, внесли работы отечественных ученых В.Н. Глущенко, В.Л. Заворотного, Г.Г. Ишбаева, М.Ш. Кендиша, Г.В. Конесева, В.Н. Кошелева, К.Ш. Овчинского, Г.А. Орлова, Н.А. Петрова, А.З. Саушина, В.И. Токунова, И.З. Файнштейна, И.Б. Хейфеца, С.Н. Шишкова, а также зарубежных авторов М. Amani, Т. Hemphill, В. Herzhaft, Р. Kenny, L.L. Schramm и др.

Исследования путей улучшения технологических свойств промывочных растворов базируются на закономерностях и фундаментальных положениях, установленных известными учеными А.А. Абрамзоном, С.С. Воюцким, Б.В. Дерягиным, К.Ф. Жигачем, Э.Г. Кистером, В. Клейтоном, Л.Д. Ландау, П.А. Ребиндером и др.

Особое внимание при анализе литературных данных уделено вопросу регулирования реологических свойств ИЭР, обобщению методов и средств управления показателями этих свойств. Показано влияние дисперсионной среды, эмульгатора, дисперсной водной фазы, твердой фазы, различных добавок-разжижителей и добавок-структурообразователей на реологические и структурно-механические свойства ИЭР.

Анализ состава и эксплуатационных показателей различных углеводородных жидкостей свидетельствует о том, что в качестве дисперсионной среды ИЭР целесообразно использовать минеральные и синтетические масла, имеющие относительно невысокую кинематическую вязкость и соответствующие современным требованиям промышленной и экологической безопасности, при этом реологические свойства ИЭР непосредственно зависят от вязкости его углеводородной основы.

По результатам обзора установлено, что химическая природа и функциональное назначение эмульгатора оказывает значительное влияние на реологические свойства инвертных растворов. Подбор вида и концентрации эмульгатора необходимо осуществлять исходя из множества факторов: геолого-технических

условий строительства скважины (температура, давление и др.), типа дисперсионной среды, водомасляного соотношения, минерализации водной фазы, свойств и содержания твердой фазы, наличия других специальных реагентов в составе промывочной жидкости.

В мировой практике в качестве структурообразователей ИЭР используют, в основном, органофильные бентониты. Однако, известен и ряд недостатков органо-бентонитов, а именно: неизбирательное повышение вязкости эмульсий во всех диапазонах скоростей сдвига, низкие показатели *ВНСС* получаемых ИЭР при высоких показателях пластической вязкости, недостаточная стабилизация структурно-механических показателей ИЭР при повышении температуры, а также необратимая коагуляция продуктивного пласта при значительных концентрациях реагента. Для успешного выполнения гидравлической программы промывки скважин в сложных условиях бурения и повышения эффективности очистки ствола актуальной является задача по совершенствованию реологического профиля ИЭР за счет разработки композиции реагентов, которая повышает вязкость раствора только при низких и средних скоростях сдвига.

Проблема обеспечения термостойкости и стабилизации реологического профиля ИЭР при изменении температуры имеет большое значение при бурении скважин сложного профиля, при этом отмечается дефицит реагентов отечественного производства для решения данной проблемы. Исходя из этого, перспективна разработка ИЭР с «плоским» реологическим профилем, несущая и удерживающая способности которого практически не зависят от колебаний температуры. Это должно быть достигнуто разработкой стабилизирующего реагента, произведенного на основе сырья отечественного производства, и оказывающего комплексное действие на регулирование технологических свойств ИЭР при высоких температурах.

Во второй главе приведено изложение используемых в диссертации существующих и усовершенствованных методов исследований, выбор которых обусловлен необходимостью придания конкретных целевых свойств разрабатываемому инвертно-эмульсионному раствору с применением комплексной добавки

для промывки скважин в сложных условиях бурения.

Модель разрабатываемого ИЭР должна обладать регулируемыми в широком диапазоне показателями реологических свойств для эффективного выноса шлама из скважин сложного профиля; низким показателем фильтрации, как при нормальных, так и при повышенных температурах и перепадах давлений; высокой агрегативной и седиментационной устойчивостью; высокой термостабильностью; стабильностью необходимых (рабочих) показателей реологических и структурно-механических свойств в широком интервале температур; высокими показателями ингибирующих свойств по отношению к породам, слагающим разрез скважин; высокими противоизносными и антифрикционными свойствами; способностью не оказывать отрицательного влияния на коллекторские свойства продуктивного пласта; промышленной и экологической безопасностью. Поэтому в диссертационной работе обоснован выбор следующих методов:

1) изучения реологических свойств ИЭР с применением приборов и устройств: для измерения реологических и структурно-механических показателей в атмосферных условиях – ротационный вискозиметр OFITE модель 800 или 900, в условиях высоких температур и давлений – ротационный вискозиметр OFITE модель 1100; для измерения вязкостных характеристик при низких скоростях сдвига – вискозиметр Брукфильда;

2) изучения влияния температуры на реологические свойства ИЭР с использованием методики, в основу которой положено определение при температурах от 20 до 150°C следующих показателей: динамическое и статическое напряжение сдвига, пластическая и эффективная вязкость, вязкость при низких скоростях сдвига (*ВНСС*), коэффициент коагуляционного структурообразования K_C , показатель нелинейности n и показатель консистенции K , коэффициент температурного разжижения k_p ;

3) исследования ингибирующих свойств ИЭР с помощью усовершенствованной методики, включающей последовательное выполнение шести этапов исследований: изучение образцов природного керна микропетрографическим, томо-

графическим, микронзондовым, рентгеноструктурным, рентгенофлюоресцентным и термическим методами с целью определения вещественного состава и структуры пород в исходном состоянии без воздействия на них промывочных растворов; тест на образование трещин в среде растворов; оценку диспергирующей способности растворов; оценку характера и интенсивности протекания осмотических процессов в системе «порода - ИЭР»; оценку изменения прочностных свойств породы под воздействием ИЭР (тест на одноосное сжатие); оценку динамики набухания глинистых сланцев в среде растворов;

4) изучения механизма действия термопластичной композиции в объеме дисперсионной среды ИЭР при увеличении температуры с применением метода оптической микроскопии и использованием для проведения исследований анализатора микроструктуры «SIAMS 700», который за счет специального программного обеспечения позволяет качественно (визуально) и количественно оценить изменения, происходящие во внутренней структуре эмульсий;

5) изучения влияния ИЭР на фильтрационно-емкостные свойства пород продуктивного пласта с использованием фильтрационной установки FDES-645 (Coretest Systems Corporation, США) в соответствии с методикой, которая позволяет, помимо обязательного расчета коэффициента восстановления проницаемости, учесть характеристики динамики фильтрации раствора, определить глубину проникновения фильтрата и степень заполнения им порового пространства колонки из образцов природного керна, установить давление отрыва фильтрационной корки.

В третьей главе приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование выбора компонентного состава ИЭР для промывки скважин в сложных условиях бурения, определены требования к инвертно-эмульсионным растворам. Выполнено поэтапное и последовательное изучение влияния состава и свойств дисперсионной среды, вида и концентрации эмульгатора, состава и степени минерализации водной фазы, вида и концентрации стабилизирующих и структурообразующих реагентов на эксплуатационные свойства ИЭР.

Подбор компонентов для улучшения эксплуатационных свойств ИЭР проводился в два этапа: 1) выбор компонентов на основе имеющейся теоретической и экспериментальной информации по литературным и промышленным данным; 2) экспериментальное изучение влияния компонентов в составе ИЭР на его технологические свойства с привлечением различных методов испытаний, позволяющих дать оценку эффективности реагентов. В соответствии с предложенными теоретическими предпосылками и принципами подбора компонентов были разработаны рецептуры низкотоксичных ИЭР на основе термопластичной композиции, состоящей из синтетического латекса и диоксановых спиртов, для промывки скважин в сложных условиях бурения. В качестве примера в таблице 1 приведена разработанная рецептура ИЭР с соотношением фаз У:В, равным 60:40. В рецептуру ИЭР входят низкотоксичная углеводородная жидкость, эмульгатор, термопластичная композиция, органобентонит и водная фаза, дополнительно могут входить пеногаситель и утяжелитель. Способ приготовления ИЭР защищен патентом РФ №2467049.

Таблица 1 – Пример разработанной рецептуры ИЭР на основе термопластичной композиции

| Наименование компонента | Назначение компонента | Концентрация компонента в 1 м ³ раствора |
|---|---|---|
| Масло Эколайт | Дисперсионная среда (малоароматическое минеральное масло) | 550 л |
| Инверол | Эмульгатор | 30 л |
| Корелат | Термопластичная композиция (регулятор реологических и структурно-механических свойств, термостабилизатор) | 30 л |
| Флотореагент-оксаль Т-92 | | 20 л |
| Насыщенный водный раствор СаСl ₂ | Дисперсная фаза | 368 л |
| Органобентонит Консит А | Понизитель фильтрации, коркообразующий реагент | 5 кг |
| Пента-467 | Пеногаситель | 0,3 л |
| Барит, мраморная крошка | Утяжелитель | до необходимой плотности |

В качестве дисперсионной среды выбраны маловязкие масла с классом вязкости по ИСО 3448-1992 не более 10 (кинематической вязкостью при 40°С – не более 9,0-11,0 мм²/с): минеральное масло Эколайт, трансформаторное масло Т-1500У, минеральное масло С-9. Данные масла отвечают требованиям пожаровзрывобезопасности, доступности и экологичности. Предпочтительное соотноше-

ние фаз У:В при использовании масла Эколайт составляет 60:40, при использовании масел Т-1500У и С-9 – 70:30.

В качестве эмульгатора выбран реагент Инверол, представляющий собой смесь аминоэфиров и амидов жирных кислот в углеводородном растворителе. Предпочтительная концентрация реагента в ИЭР составляет 3% об. Сравнительные исследования показали, что данный эмульгатор обеспечивает раствору более высокую агрегативную и кинетическую устойчивость, удовлетворительные значения показателей реологических и фильтрационных свойств по сравнению с аналогами. Однако, термостойкость ИЭР на его основе ограничена 120°C и, по нашему мнению, является недостаточной для бурения высокотемпературных скважин.

При выборе дисперсной (водной) фазы учитывалось влияние ее состава и степени минерализации на агрегативную устойчивость и ингибирующие свойства ИЭР. Изучение влияния минерализации водной фазы на ингибирующие свойства ИЭР по отношению к аргиллитовым породам тимано-саргаевского (кыновского) горизонта, создающим наибольшие осложнения в виде осыпей и обвалов при бурении горизонтальных скважин во многих регионах РФ (Пермский край, республики Татарстан, Башкортостан, Коми и др.), показало, что для предупреждения разупрочнения пород предпочтительно использовать ИЭР, водная фаза которых в максимальной степени насыщена по иону кальция, в частности применением солей CaCl_2 и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Соотношение фаз У:В в растворе существенного влияния на прочностные свойства керна не оказывает. В частности, по результатам исследований диспергирующей способности ИЭР установлено, что показатель эрозии пород тимано-саргаевских аргиллитовых отложений снижается при использовании в качестве водной фазы эмульсии вместо пресной воды насыщенных растворов CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KCl , MgCl_2 в 2,7; 2,4; 1,4; 1,1 раза, соответственно.

Выбор регулятора реологических и структурно-механических свойств ИЭР проведен на основании сравнительных экспериментальных исследований различных маслорастворимых полимеров из класса полиизобутиленов и латексов. В качестве структурообразователей для ИЭР обоснован выбор латексных реагентов Нефтелат и Корелат, коммерчески выпускаемых для нефтедобываю-

щей промышленности и являющихся более технологичными в зимних условиях. Экспериментально установлены рабочие концентрации указанных реагентов, которые составили 2÷4% об.

В качестве добавок, снижающих эффективную вязкость ИЭР при высоких скоростях сдвига, в наших исследованиях успешно показали себя различные марки оксалея в концентрациях от 1 до 2% об., которые получают в процессе производства диметилдиоксана.

Согласно теории гидрофобных взаимодействий некоторые неполярные молекулы способны образовывать между собой прочные ассоциаты в процессе мицеллообразования. Для активации таких взаимодействий известно применение низкомолекулярных неионогенных ПАВ из класса спиртов и эфиров, которые адсорбируясь на поверхности дисперсной фазы (макромолекулах полимера) образуют гидрофобизированные структуры. Исходя из этого, вполне вероятно возникновение гидрофобных взаимодействий между длинноцепочечными молекулами бутадиен-стирольного каучука, содержащихся в коллоидном виде в составе латекса, и малыми молекулами диоксановых спиртов и эфиров, находящихся в составе флотореагента-оксаля. В связи с этим, проведены экспериментальные исследования совместного влияния синтетического латекса и диоксановых спиртов на эксплуатационные свойства ИЭР при нормальных и повышенных температурах (до 90°C). Проведенные исследования подтвердили возникновение синергетического эффекта при совместном вводе в состав ИЭР синтетического латекса и диоксановых спиртов, позволяющего при нормальной температуре значительно повышать структурно-механические свойства и агрегативную устойчивость, снижать показатели фильтрации ИЭР до минимальных значений, а при повышении температуры сохранять показатели перечисленных свойств ИЭР в рабочем диапазоне. С помощью регрессионного анализа установлено, что композиция, содержащая 2÷4% синтетического латекса и 1÷2% диоксановых спиртов, способна стабилизировать реологический профиль ИЭР при повышении температуры, сохранять несущую и удерживающую способности растворов независимо от колебаний температуры в скважине, снижать показатель фильтрации прак-

тически до нулевых значений и повышать общую термостойкость ИЭР до 170°C.

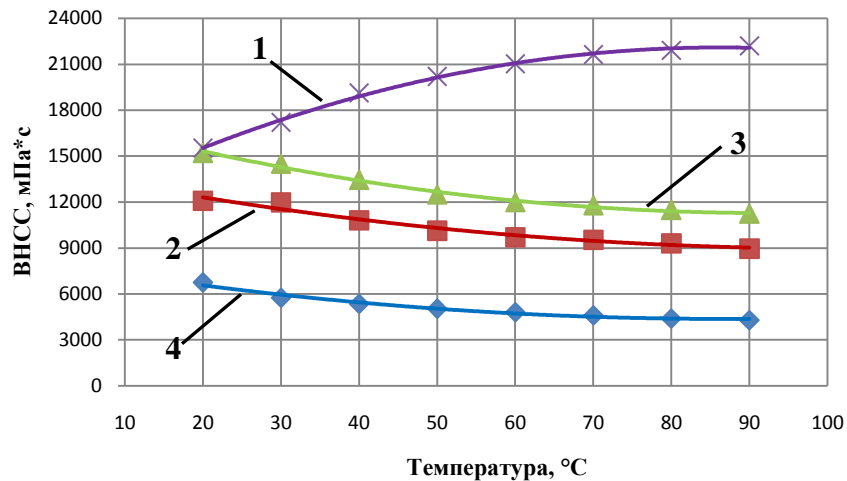
Таким образом, теоретически и экспериментально обоснован выбор компонентного состава и рецептуры ИЭР на основе термопластичной композиции (ИЭР-ТПК), имеющего усовершенствованный реологический профиль, улучшенные ингибирующие свойства и обладающего способностью стабилизировать реологические, структурно-механические и фильтрационные свойства раствора при промывке скважин сложного профиля в условиях повышенных температур.

В четвертой главе приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований технологических свойств рецептур ИЭР-ТПК для бурения скважин в сложных термобарических условиях.

Исследования реологических свойств инвертно-эмульсионных растворов показали, что в отличие от традиционных ИЭР на основе органобентонитов, показатели эффективной вязкости ИЭР-ТПК в области высоких скоростей сдвига ($170 \div 1022 \text{ с}^{-1}$) при увеличении температуры снижаются, тогда как в области низких скоростей сдвига ($0,5 \div 85 \text{ с}^{-1}$) – повышаются. Снижение показателя эффективной вязкости ИЭР-ТПК при повышении температуры в области высоких скоростей сдвига способствует снижению гидравлических сопротивлений в бурильной колонне, повышает степень очистки забоя скважины от выбуренной породы и степень охлаждения вооружения долота, вследствие чего возрастает ресурс его работы и механическая скорость бурения. Увеличение же показателя эффективной вязкости в области низких скоростей сдвига свидетельствует об усилении несущей способности ИЭР-ТПК при повышении температуры, что особенно важно при бурении скважин сложного профиля. Кроме того, по результатам исследований установлено, что повышение температуры приводит к улучшению псевдопластичных свойств ИЭР-ТПК, о чем свидетельствует снижение показателя неньютоновского поведения раствора n при увеличении температуры, а также снижение коэффициента температурного разжижения k_p при увеличении скорости сдвига.

Сравнительные исследования ИЭР на основе предложенной нами термопла-

стичной композиции с инвертными эмульсиями на основе реагентов из класса полиизобутиленов, которые широко используются в качестве структурообразователей для РУО рядом ведущих зарубежных и отечественных компаний, показали преимущества термопластичной композиции в отношении регулирования показателей реологических свойств ИЭР в области низких скоростей сдвига, особенно при повышенных температурах (Рисунок 7).



(1 – ИЭР-ТПК; 2 – ИЭР на основе полиизобутилена ($M_r = 4000-6000$);
3 – ИЭР на основе полиизобутилена ($M_r = 15000-25000$); 4 – традиционный ИЭР)

Рисунок 1 – Влияние температуры на показатели ВНСС различных рецептур ИЭР

Из рисунка 1 видно, что при повышении температуры значения показателей *ВНСС* традиционного ИЭР и растворов на основе полиизобутиленов различной молекулярной массы снижаются, в то время как значения аналогичного показателя ИЭР-ТПК, напротив, увеличиваются. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что ИЭР-ТПК является термоупрочняющейся системой, повышающей несущую и удерживающую способности при увеличении температуры. Добавка термопластичной композиции в ИЭР позволяет стабилизировать реологический профиль раствора, улучшая его способность очищать скважину от выбуренной породы при увеличении температуры за счет псевдопластичности и повышения эффективной вязкости при низких скоростях сдвига. Благодаря «плоскому» реологическому профилю ИЭР-ТПК является более предпочтительным для промывки скважин в сложных геолого-технических и термобарических условиях. С целью изучения влияния повышенных температур на фильт-

рационные свойства ИЭР-ТПК нами проведены экспериментальные исследования с использованием фильтр-пресса OFITE модели НРНТ (Рисунок 2).

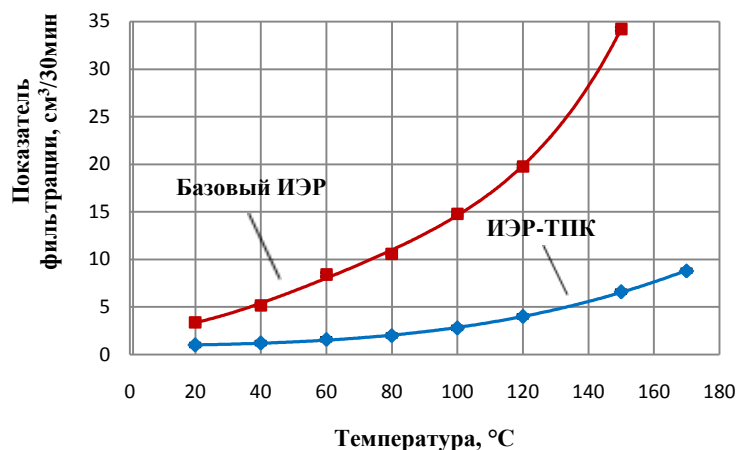
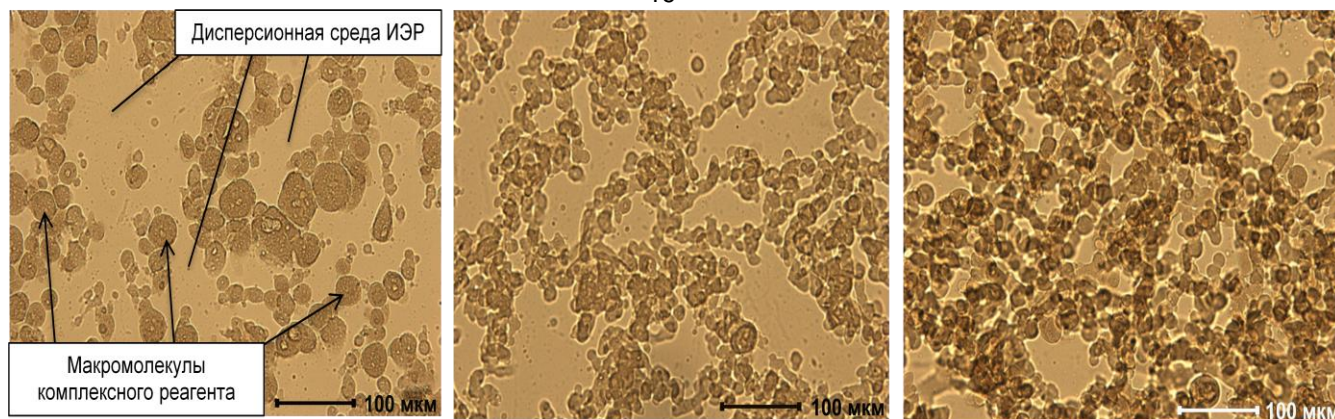


Рисунок 2 – Влияние температуры на показатели фильтрации инвертных растворов при перепаде давления $\Delta P = 3,5$ МПа

Данные, представленные на рисунке 2, свидетельствуют о более сильном влиянии температуры на показатель фильтрации базового ИЭР. При увеличении температуры до 120°C показатель фильтрации базового ИЭР возрастает практически линейно, а при повышении температуры более 120°C – наблюдается резкое увеличение показателя фильтрации раствора и в фильтрате появляются следы воды. Указанные изменения фильтрационных свойств базового ИЭР характеризуют его недостаточную термостойкость при высоких температурах. При прочих равных условиях ИЭР-ТПК имеет более низкие показатели фильтрации при различных объемных температурах, чем базовый ИЭР. При температурах до 170°C и перепаде давления $\Delta P = 3,5$ МПа показатели фильтрации ИЭР-ТПК находятся в рабочем диапазоне и не превышают $10 \text{ см}^3/30\text{мин}$. Фильтрат ИЭР-ТПК при указанных условиях представляет собой углеводородную жидкость без следов водной фазы.

С целью выяснения механизма физико-химических процессов, происходящих при увеличении температуры в объеме дисперсионной среды ИЭР с добавкой термопластичной композиции, проведены исследования с помощью оптического микроскопа. Изучение микроструктуры раствора проводили при температурах 25 , 50 и 75°C . На рисунке 3 представлены фотоснимки, которые наглядно демонстрируют физико-химические процессы, происходящие при нагревании в объеме дисперсионной среды.



а – $T = 25^{\circ}\text{C}$

б – $T = 50^{\circ}\text{C}$

в – $T = 75^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3 (а, б, в) – Фотографии дисперсионной среды ИЭР с добавкой термопластичной композиции, сделанные с помощью оптического микроскопа

Из рисунка 3 а видно, что при комнатной температуре макромолекулы термопластичной композиции сконцентрированы в объеме дисперсионной среды ИЭР в виде агрегатов, по всей вероятности состоящих из комплексных соединений синтетического латекса и диоксановых спиртов. Увеличение температуры способствует разобцению крупных агрегатов термопластичной композиции на более мелкие, благодаря чему термопластичная композиция лучше распределяется в объеме дисперсионной среды, а ее макромолекулы образуют трехмерную сетку (Рисунок 3 б, в). Очевидно, именно данный механизм действия термопластичной композиции, основанный на образовании трехмерной сетки из макромолекул полимера, приводит к стабилизации реологического профиля раствора, позволяет избирательно повышать показатели реологических и структурно-механических свойств с ростом температуры.

Сравнительные исследования триботехнических свойств промывочных растворов показали, что ИЭР-ТПК имеют значительно более низкие коэффициенты трения пары «металл-металл» по сравнению с растворами на водной основе. Данный факт неоднократно подтвержден в научно-технической литературе и на практике. Несмотря на присутствие в составе ИЭР значительного количества водной фазы, они обладают высокими смазывающими свойствами, близкими к свойствам их олеофильных основ.

Кроме того, нами выделены наиболее перспективные направления утилиза-

ции отработанных ИЭР, теоретически обоснован и экспериментально подтвержден способ утилизации отработанных ИЭР путем их использования в качестве смазочных и антиприхватных добавок к растворам на водной основе. Показано, что ввод отработанного ИЭР-ТПК в состав биополимер-хлоркалиевого и полимер-глинистого раствора в качестве смазочной добавки позволяет улучшать их противоизносные и антифрикционные свойства, при этом, не ухудшая их технологических свойств. Определены рабочие концентрации отработанного ИЭР-ТПК в качестве смазочной добавки для растворов на водной основе, которые составляют 2-5% об. Установлено, что эффективность смазывающего действия добавок отработанного ИЭР-ТПК сопоставима с эффективностью широко используемой смазочной добавкой Бурфлюб-БТ. На основании проведенных исследований предложена технология использования отработанных ИЭР-ТПК в качестве смазочных добавок к буровым растворам на водной основе.

Выполнены сравнительные исследования ингибирующих свойств ИЭР-ТПК и растворов на водной основе по отношению к терригенным отложениям бобриковского и кыновского горизонтов. Ингибирующую способность оценивали по коэффициенту продольного набухания образцов породы в среде раствора с помощью тестера линейного набухания глинистых сланцев OFITE (Рисунок 4).

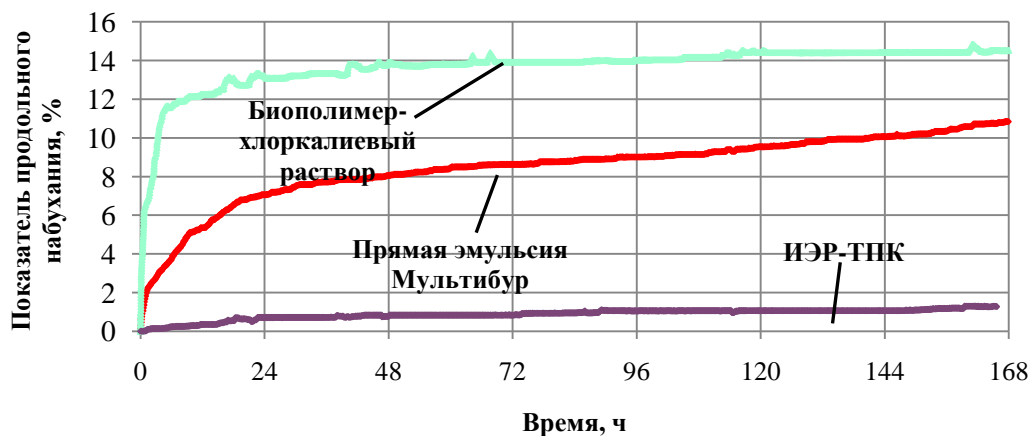


Рисунок 4 – Динамика продольного набухания пород кыновского горизонта под воздействием промывочных растворов

По результатам исследований установлено, что ИЭР-ТПК имеет более высокие ингибирующие свойства по отношению к породам как бобриковского, так и кыновского горизонтов, чем растворы на водной основе. Показатель продольного

набухания образцов пород кыновского горизонта в среде ИЭР-ТПК до 11 раз ниже, чем аналогичный показатель в среде растворов на водной основе. Выполнены исследования влияния ИЭР-ТПК на коллекторские свойства продуктивного пласта, представленного терригенными породами. Установлено, что ИЭР-ТПК обладает высоким коэффициентом восстановления проницаемости, восстановление проницаемости происходит в короткий период времени, глубина проникновения фильтрата не превышает 10% от объема пор керновой колонки, а давление отрыва фильтрационной корки ИЭР-ТПК имеет низкие значения.

Таким образом, ИЭР на основе термопластичной композиции по ряду важнейших показателей превосходит традиционные промывочные растворы и может быть рекомендован для промывки скважин в сложных геолого-технических и термобарических условиях бурения.

В пятой главе изложены результаты промысловых испытаний ИЭР-ТПК при бурении эксплуатационных скважин сложного профиля на месторождениях Пермского края и Ненецкого автономного округа.

Успешно проведены опытно-промышленные испытания ИЭР-ТПК на горизонтальной скважине № 1534 Харьягинского месторождения, которое характеризуется сложными условиями бурения: высокими пластовыми температурами (до 90°C) и осложнениями, связанными с осыпями и обвалами неустойчивых тимано-саргаевских пород. Техничко-экономическая эффективность использования ИЭР-ТПК рассмотрена в сравнении с использовавшимися ранее для бурения горизонтальных скважин на Харьягинском месторождении инвертно-эмульсионными растворами ведущей зарубежной компании. В результате испытаний отмечено отсутствие проблем, связанных с неустойчивостью стенок скважины, некачественной очисткой ствола, затяжек и посадок при проведении спуско-подъемных операций. Установлено следующее:

1. Применение ИЭР-ТПК позволило предотвратить осыпи и обвалы неустойчивых тимано-саргаевских пород, вскрытых под большим зенитным углом.

2. Использование термопластичной композиции в составе ИЭР позволило обеспечить высокую управляемость и стабильность показателей реологических,

структурно-механических и фильтрационных свойств раствора в условиях повышенных температур.

3. За счет применения ИЭР-ТПК удалось сократить затраты на ликвидацию осложнений в среднем на 19 млн. руб. на скважину.

4. Получена рекомендация от ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ» продолжить промышленные испытания при бурении горизонтальных скважин на девонские отложения на месторождениях Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

На месторождениях Пермского края в период с 2011 по апрель 2016 года, при строительстве горизонтальных скважин успешно проведены промышленные испытания и широкое внедрение ИЭР на основе термопластичной композиции в качестве промывочной жидкости на 143 скважинах. За счет сокращения материальных и временных затрат на ликвидацию осложнений и снижения аварийности с бурильным инструментом и обсадной колонной получен технико-экономический эффект от применения технологии – 1,3 млн. руб. на одну скважину. Суммарный экономический эффект при использовании ИЭР-ТПК в Пермском регионе составил около 186 млн. руб.

Для промышленного применения ИЭР-ТПК разработаны и утверждены:

- в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» «Инструкция по технологии приготовления, применению и регулированию параметров буровых растворов» (г. Пермь, 2012г.);
- в ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ» «Регламент по технологии приготовления и применению эмульсионного бурового раствора для бурения горизонтальных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ» (г. Пермь, 2014 г.).

Кроме того, разработанная технология активно используется филиалом «ПермНИПИнефть» при составлении проектно-сметной документации – групповых рабочих проектов и индивидуальных программ на строительство и реконструкцию скважин.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Проведен анализ технологий в области применения и регулирования эксплуатационных свойств инвертных эмульсионных растворов, выявлены проблемы управления реологическими показателями ИЭР при существенном утяжелении растворов твердой фазой (инертными добавками) и при изменении температуры.

Для стабилизации ИЭР и регулирования их реологических, структурно-механических и фильтрационных показателей при повышенных температурах показана перспективность использования маслорастворимых полимерных реагентов из класса полиизобутиленов, каучуков и латексов, при этом, на основании теории гидрофобных взаимодействий предложено применять их совместно с неионогенными соединениями из класса спиртов.

2 Усовершенствована методика по изучению ингибирующих свойств буровых промывочных жидкостей за счет применения комплекса методов исследований, включающего определение вещественного состава и структуры пород в исходном состоянии без воздействия на них промывочных растворов; тест на образование трещин в среде растворов; оценку диспергирующей способности растворов; оценку характера и интенсивности протекания осмотических процессов в системе «порода-ИЭР»; оценку изменения прочностных свойств породы под воздействием ИЭР (тест на одноосное сжатие); оценку динамики набухания глинистых сланцев в среде растворов.

3 Разработана композиция реагентов на основе синтетического латекса и диоксановых спиртов, сохраняющая показатели реологических свойств инвертно-эмульсионных растворов в рабочем диапазоне при температурах до 150°C. Ввод композиции в раствор позволяет при увеличении температуры от 25 до 150°C увеличивать показатель СНС на 73% (с 56 до 97 дПа), показатель ДНС – на 27% (со 183 до 233 дПа). Установлено, что указанная термопластичная композиция дополнительно позволяет снижать показатель фильтрации практически до нулевых значений и повышать общую термостойкость ИЭР до 170°C.

4 Разработаны на уровне изобретения рецептуры и способ приготовления инвертно-эмульсионных растворов на основе термопластичной композиции для бурения скважин в сложных горно-геологических и термобарических условиях. Разработанные ИЭР имеют «плоский» реологический профиль и обладают способностью сохранять в рабочем диапазоне показатели реологических (τ_0 , K_C , $BHCC$), структурно-механических (CHC) и фильтрационных свойств (Φ , Φ_{HPT}) при промывке скважин сложного профиля в условиях повышенных температур (до 170°C). Показано, что данные промывочные растворы превосходят используемые в буровой технологии аналоги по реологическим, структурно-механическим, фильтрационным, ингибирующим и триботехническим свойствам.

5 Проведены успешные промысловые испытания и широкое внедрение ИЭР на основе термопластичной композиции в качестве промывочных жидкостей при

строительстве 143 горизонтальных скважин на месторождениях Пермского края и 1 скважины Ненецкого автономного округа, получен положительный технико-экономический эффект около 186 млн. руб. Разработаны и утверждены регламенты по технологии приготовления и применения в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» и ООО «ЛУКОЙЛ-КОМИ». Разработанная технология активно используется филиалом «ПермНИПИнефть» при составлении проектно-сметной документации на строительство и реконструкцию скважин.

Основные положения и результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобробразования и науки РФ:

1. Гаршина, О.В. Разработка, опыт применения и перспективы повторного использования инвертно-эмульсионных буровых растворов / О.В. Гаршина, П.А. Хвоцин, О.Г. Кузнецова [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 10. – с. 56-59.

2. Некрасова, И.Л. Технология утилизации отработанных инвертно-эмульсионных буровых растворов / И.Л. Некрасова, П.А. Хвоцин, О.В. Гаршина [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 06. – с. 62-64.

3. Хвоцин, П.А. Совершенствование технологии строительства горизонтальных скважин с использованием инвертно-эмульсионных буровых растворов / П.А. Хвоцин, И.Л. Некрасова, О.В. Гаршина [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 08. – с. 20-25.

4. Хвоцин, П.А. Утяжеленный инвертный эмульсионный раствор с регулируемым реологическим профилем для строительства горизонтальных скважин/П.А. Хвоцин, И.Л. Некрасова, О.В. Гаршина, Г.В. Конесев // Нефтегазовое дело. – 2015. – Том 13. – № 1. – с. 35-44.

5. Пат. 2467049 Российская Федерация, С09К8/36. Способ приготовления инвертно-эмульсионного бурового раствора / Некрасова И.Л., Гаршина О.В., Хвоцин П.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» – №2011105219/03; заявл. 11.02.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. №32.

В других изданиях:

6. Khvoshchin, P. The results of horizontal well drilling using invert-emulsion fluid at Kharyaginskoe Field / P. Khvoshchin, N. Lyadova, S. Piasov [et al] // Paper SPE 171283 presented at the SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 14-16 October, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа – <http://dx.doi.org/10.2118/171283-MS> ограниченный – 16 p.

7. Гаршина, О.В. Разработка, опыт применения инвертно-эмульсионного бурового раствора и перспективы его повторного использования / О.В. Гаршина, П.А. Хвоцин, И.Л. Некрасова [и др.] // Эфиры целлюлозы и крахмала, другие новые химические реагенты и композиционные материалы как основа успешного сервиса и высокого качества технологических жидкостей для строительства, эксплуатации и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин. Материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. – Суздаль, 2011. – с. 102-108.

8. Некрасова, И.Л. Разработка и применение комплексного реагента-модификатора реологических характеристик инвертно-эмульсионного бурового раствора / И.Л. Некрасова, П.А. Хвоцин, О.В. Гаршина [и др.] // Нефтепромысловая химия. Материалы VIII Всероссийской науч.-практ. конф. – М., 2013. – с. 11-15.

9. Хвоцин, П.А. Использование инвертно-эмульсионного бурового раствора при строительстве горизонтальной скважины на Харьятинском месторождении / П.А. Хвоцин, Н.А. Лядова, С.Е. Ильясов [и др.] // Инженерная практика. – 2015. - № 3. – с. 32-35.