

На правах рукописи

Бязров Роман Русланович



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАВОДНЕНИЯ
НЕОДНОРОДНЫХ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПАВ-ПОЛИМЕРНОГО СОСТАВА**

*Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Подопригора Дмитрий Георгиевич

Официальные оппоненты:

Ленченкова Любовь Евгеньевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений, профессор;

Морозюк Олег Александрович

кандидат технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «РН-Геология Исследования Разработка», управление НИОКР в области исследования керна и пластовых флюидов Центра исследования керна, старший эксперт.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск.

Защита диссертации состоится **5 декабря 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.13 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 3 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



САВЕНОК
Ольга Вадимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для России ключевую роль в формировании сырьевой базы жидких углеводородов играет Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция (НГП), на долю которой приходится около 2/3 запасов нефти и конденсата страны. На сегодняшний день большинство месторождений вышеуказанной провинции перешло на позднюю стадию разработки, характерными особенностями которой является высокая степень обводненности добываемой продукции, низкий уровень отбора от начальных извлекаемых запасов и низкий темп разработки. Одним из таких активов, находящемся на стадии доизвлечения в Западно-Сибирской НГП, являются залежи с неоднородными терригенными породами-коллекторами, приуроченные к алымской и ванденской свитам.

Разработка подавляющего большинства подобных объектов осуществляется с поддержанием пластового давления (ППД) за счет непрерывной закачки воды в пласт через нагнетательные скважины. Однако эффективность традиционного заводнения залежей с неоднородными терригенными коллекторами с точки зрения полноты извлечения нефти до сих пор оценивается как неудовлетворительная.

Для увеличения степени выработки запасов на действующих месторождениях могут применяться различные технологии увеличения нефтеотдачи пластов, часть из которых направлена на повышение вытесняющей и отмывающей способности воды, в первую очередь за счет добавления в неё различных химических реагентов. Такие методы принято называть физико-химическими методами увеличения нефтеотдачи, среди которых можно выделить следующие основные виды: полимерное, ПАВ-полимерное и щелочь-ПАВ-полимерное заводнение.

Внедрение подобных технологий требует индивидуального подхода при разработке химического состава, совместимого с пластовыми флюидами и горной породой, сохраняющего свои основные свойства в условиях пласта, а также обеспечивающего наибольший эффект с точки зрения полноты извлечения нефти.

В связи с этим актуальным становится обоснование применения технологии химического заводнения залежей с неоднородными терригенными породами-коллекторами.

Степень разработанности темы исследования

На разных этапах развития нефтегазовой отрасли в решение проблем, связанных с разработкой и совершенствованием физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, существенный вклад внесли такие видные деятели науки и промышленности, как Л.К. Алтунина, В.Е. Андреев, Г.А. Бабалян, Ю.П. Борисов, М.Д. Валеев, В.Е. Гавура, А.А. Газизов, А.Ш. Газизов, А.Т. Горбунов, В.В. Девликамов, Р.Н. Дияшев, Ю.П. Желтов, С.А. Жданов, Ю.В. Зейгман, Р.Р. Ибатуллин, Л.Е. Ленченкова, И.Л. Мархасин, Н.Н. Михайлов, М.Х. Мусабиров, Г.А. Орлов, М.К. Рогачев, П.А. Ребиндер, Н.М. Саркисов, М.Н. Саттаров, В.А. Стрижнев, К.В. Стрижнев, М.Л. Сургучев, А.Г. Телин, В.Г. Уметбаев, Р.Н. Фахретдинов, А.Я. Хавкин, Р.С. Хисамов, И.А. Швецов, И.Н. Шустеф, E. Delamide, R. Seright, A. Thomas и многие другие исследователи.

Объект исследования – нефтесодержащие пласты с неоднородными терригенными коллекторами алымской и ванденской свит (группа пластов АВ) Западно-Сибирской НГП на поздней стадии разработки с искусственным заводнением.

Предмет исследования – физико-химические и гидродинамические процессы в объекте исследования.

Цель работы – повышение степени извлечения нефти из неоднородных терригенных коллекторов при их заводнении.

Идея работы - внедрение технологии физико-химического воздействия на продуктивные пласты, основанной на закачке разработанного ПАВ-полимерного состава.

Задачи исследования:

1. Проанализировать особенности разработки неоднородных терригенных коллекторов, а также физико-химические методы увеличения нефтеотдачи на таких объектах.

2. Провести литературно-патентный анализ отечественного и мирового опыта исследований и реализации ПАВ-полимерного заводнения с целью повышения нефтеотдачи пластов.

3. Разработать и обосновать программу проведения лабораторных исследований ПАВ-полимерных составов для неоднородных терригенных коллекторов.

4. Разработать химический состав для заводнения неоднородных терригенных коллекторов.

5. Исследовать физико-химические, реологические и фильтрационные свойства разработанного состава.

6. Показать эффективность разработанного состава на физической и гидродинамической моделях объекта исследования.

7. Обосновать технологию заводнения неоднородных терригенных коллекторов с использованием предлагаемого состава.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость изменения физико-химических и реологических свойств ПАВ-полимерного состава, представляющего собой водный раствор смеси анионного ПАВ (лауретсульфат натрия) и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки, от концентрации входящих в состав компонентов, что позволило разработать оптимальный ПАВ-полимерный состав на основе модели закачиваемой в пласт воды системы ППД (ПАВ-0,7 % масс., полимер-0,175 % масс.).

2. Установлено, что добавление анионного ПАВ (лауретсульфат натрия) и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки, к закачиваемой в пласт воде системы ППД приводит к увеличению коэффициента извлечения нефти из модели неоднородных терригенных коллекторов до 0,164 д.ед.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений по пунктам: 2. Геолого-физические, геомеханические, физико-химические, тепломассообменные и биохимические процессы, протекающие в естественных и искусственных пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр и подземном хранении жидких и газообразных углеводородов и водорода известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для развития

научных основ создания эффективных систем разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода, захоронения кислых газов, включая диоксид углерода; 3. Научные основы технологии воздействия на межскважинное и околоскважинное пространство и управление притоком пластовых флюидов к скважинам различных конструкций с целью повышения степени извлечения из недр и интенсификации добычи жидких и газообразных углеводородов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснован научно-методический подход к разработке ПАВ-полимерных составов для повышения нефтеотдачи неоднородных терригенных коллекторов, включающий выбор компонентов состава с учетом уточненного механизма их взаимодействия между собой и совместного влияния на процесс извлечения нефти из таких коллекторов при искусственном заводнении.

2. Создана программа лабораторных исследований по разработке и тестированию свойств ПАВ-полимерных составов, используемых для заводнения неоднородных терригенных коллекторов.

3. Разработан состав, представляющий собой водный раствор частично-гидролизованного полиакриламида и анионного ПАВ, предназначенный для применения при искусственном заводнении неоднородных терригенных коллекторов с целью повышения их нефтеотдачи.

4. Обоснована и рекомендована к промышленному внедрению на нефтяных месторождениях с неоднородными терригенными коллекторами технология физико-химического воздействия на нефтяной пласт, основанная на закачке через нагнетательные скважины системы ППД разработанного состава.

5. Разработана программа для ЭВМ «Программа расчета основных технологических показателей разработки при внедрении технологии полимерного заводнения» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664186).

6. Материалы и результаты работы были использованы в деятельности компании ООО «ПМ-ГРУПП» при реализации работ в рамках проектов полимерного и ПАВ-полимерного заводнения (акт внедрения от 28.05.2024).

Методология и методы исследования:

Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических исследований, а также со стандартными и разработанными методиками проведения экспериментальных исследований (исследование физических и реологических свойств полимерных и ПАВ-полимерных составов, физическое моделирование процесса вытеснения нефти полимерными и ПАВ-полимерными составами). Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Добавление анионного ПАВ (лауретсульфат натрия) в концентрации до 0,7 % масс. и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки в концентрации до 0,175 % масс., улучшает физико-химические и реологические свойства модели закачиваемой в пласт воды системы ППД (снижает межфазное натяжение на границе с нефтью до уровня 10^{-2} мН/м; увеличивает эффективную вязкость до 10 раз), что позволило рекомендовать получаемый таким образом состав для повышения эффективности заводнения неоднородных терригенных коллекторов.

2. Выявленная с помощью физического и гидродинамического моделирования способность разработанного состава повышать нефтеотдачу моделей пласта позволила обосновать технологию извлечения остаточной нефти при заводнении неоднородных терригенных коллекторов.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями с применением современного высокоточного оборудования комплексной лаборатории «Повышение нефтеотдачи пластов» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, достаточной сходимостью расчетных и экспериментальных данных и воспроизводимостью полученных

результатов. Полученные результаты апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Апробация диссертационного исследования проведена на 9 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных. За последние 3 года принято участие в 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: Международной практической конференции «Heavy Oil» (2022 г., г. Самара.); Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (15-17 ноября 2022 г., г. Санкт-Петербург); XXVII International conference for Students and Young Researchers: «Perfect Education – The key to success in oil and gas production» (29 апреля 2023 г., г. Баку, Азербайджан); 16-й Международной конференции «Рассохинские чтения» (1-2 февраля 2024 г., г. Ухта); Всероссийской конференции «Ашировские чтения 2024» (13-14 ноября 2024 г., г. Самара); XX Всероссийской конференции-конкурсе «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря 2024 г. г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в анализе и обобщении публикаций по теме диссертации, постановке и проведении экспериментов в лабораториях, обработке и интерпретации результатов экспериментов, подготовке текста диссертации, формулировании выводов и основных защищаемых положений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 статьях - 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), в 4 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 136 наименований, и 3 приложений. Диссертация

изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 43 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность за неоценимую помощь, постоянную поддержку и внимание в процессе подготовки работы и при обсуждении ее результатов научному руководителю - заведующему кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, к.т.н., доценту Подопригоре Д.Г. Автор признателен д.т.н., профессору Рогачеву М.К. за конструктивные советы в ходе выполнения работы, а также всем сотрудникам кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений и центра компетенций в области техники и технологий освоения месторождений в Арктических условиях Санкт Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Особую благодарность за привитый с детства интерес к наукам о Земле автор выражает своему дедушке - Заслуженному геологу Российской Федерации Халецкому М.С.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа текущего состояния разработки объектов Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, в частности объектов, приуроченных к алымской и ванденской свитам. К указанным свитам относятся нефтесодержащие пласты группы АВ, которые являются потенциальными кандидатами для внедрения химического заводнения. Произведен анализ существующих физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, на основе закачки большеобъемных оторочек водных растворов реагентов через систему поддержания пластового давления. Рассмотрены различные виды полимеров и ПАВ для реализации технологий химического заводнения. Представлены результаты уже реализованных проектов в России.

Во второй главе представлены основные требования к полимерам и поверхностно-активным веществам для реализации технологии химического заводнения. Разработана программа исследований полимеров, ПАВ и ПАВ-полимерных составов. Приведено описание методик лабораторных экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.

В третьей главе приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований полимерных составов, водных растворов ПАВ и разработанных ПАВ-полимерных составов. Представлены результаты лабораторных исследований реологических свойств полимерных составов, изучено взаимодействие растворов ПАВ с закачиваемыми и пластовыми флюидами, в частности произведена оценка снижения межфазного натяжения от концентрации ПАВ. Разработана рецептура ПАВ-полимерного состава для заводнения неоднородных терригенных коллекторов. Оценено влияние концентрации компонентов на основные свойства разработанного состава.

В четвертой главе на физической и гидродинамической модели оценена эффективность предлагаемого к внедрению ПАВ-полимерного состава. Рассмотрены различные объемы закачки ПАВ-полимерного состава и оценен потенциальный прирост КИН. Представлены основные сведения о необходимом инженерно-технологическом обеспечении для реализации технологии.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Добавление анионного ПАВ (лауретсульфат натрия) в концентрации до 0,7 % масс. и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки в концентрации до 0,175 % масс., улучшает физико-химические и реологические свойства модели закачиваемой в пласт воды системы ППД (снижает межфазное натяжение на границе с нефтью до уровня 10^{-2} мН/м; увеличивает эффективную вязкость до 10 раз), что позволило рекомендовать получаемый таким образом состав для повышения

эффективности заводнения неоднородных терригенных коллекторов.

В качестве потенциального метода увеличения нефтеотдачи нефтесодержащих пластов алымской и ванденской свит Западно-Сибирской НПП, а именно объекта разработки АВ₁₋₂, может рассматриваться химическое заводнение, которое заключается в добавлении к закачиваемой в пласт воде полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Ключевым вопросом при проектировании технологии химического заводнения является разработка ПАВ-полимерного состава.

В рамках работы проводились исследования полимеров, ПАВ и ПАВ-полимерного состава. В качестве полимеров рассматривались образцы частично-гидролизованного полиакриламида со степенью гидролиза 20-30 %, молекулярной массой от 7,3 до 20,3·10⁶ Да и с содержанием акриламид-трет-бутилсульфокислоты в диапазоне 0-15 %. В качестве ПАВ рассматривались: 1) анионные на основе алкилбензолсульфоната натрия, лауретсульфата натрия, додецилбензолсульфоната натрия, альфа-олефин сульфоната натрия; 2) амфотерные на основе бетаина и олеил бетаина; 3) неионогенные на основе диэтаноламида лауриновой кислоты. Все рабочие растворы готовились на модели воды, минерализация которой составляет 22,8 г/дм³. Химический состав воды представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав используемой воды

Компонент	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻
Значение, мг/дм ³	940,0	96,0	7 753,1	13 736,8	268,4	1,26

Результаты исследований физико-химических характеристик полимерных растворов представлены в таблице 2. Дополнительно были установлены зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига при различных концентрациях полимера. На основании этих данных и с учетом статической адсорбции, а также механической и термической деструкции были определены концентрации полимеров для фильтрационных исследований, обеспечивающих превышение вязкости полимерного раствора над вязкостью нефти (3,62 мПа с) при температуре пласта и скорости сдвига 122,3 с⁻¹.

Таблица 2 – Результаты исследований физико-химических характеристик полимерных растворов

Показатель	3230 S	3630 S	5205 SH	5205 VHM
Молекулярная масса, 10 ⁶ Да	7,3	20,3	12,7	16,1
Время растворения, мин	60	160	120	140
Статическая адсорбция полимеров, мг/г	0,33	0,36	0,28	0,3
Процент потери вязкости (механическая), %	10,1	14,6	8,8	9,9
Процент потери вязкости (термоокислительная), %	11,2	22,3	5,9	6,9

На следующем этапе проводились фильтрационные эксперименты, в рамках которых определялись фактор сопротивления (ФС), остаточный фактор сопротивления (ОФС) и коэффициент вытеснения (Квыт) нефти. Результаты фильтрационных исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты фильтрационных исследований полимерных растворов

Параметр	Тест №1	Тест №2	Тест №3	Тест №4
Длина/диаметр образца керна, см	3,42/2,98	3,37/3,01	3,18/2,99	3,24/2,97
Пористость образца керна, %	22,43	21,48	23,23	23,43
Проницаемость образца керна, мкм ²	0,193	0,172	0,191	0,190
Образец полимера	3630 S	5205 VHM	5205 SH	3230 S
Концентрация, % масс.	0,15	0,15	0,175	0,23
Квыт (по воде), д.ед.	0,49	0,51	0,52	0,55
Квыт (с учетом полимера), д.ед.	0,54	0,58	0,63	0,64
Прирост Квыт, д.ед.	0,05	0,07	0,11	0,09
ФС	43,91	33,02	19,51	12,73
ОФС	8,35	4,17	3,88	4,86

Учитывая прирост коэффициента вытеснения нефти (0,11 д.ед.) и результаты физико-химических и реологических исследований (молекулярная масса, стойкость к деструкции и значение статической адсорбции), для дальнейших экспериментов был использован образец FP 5205 SH.

На следующем этапе проводились физико-химические исследования растворов ПАВ, результаты которых представлены в таблице 4. На первой стадии отсеивались ПАВ, которые не подтвердили возможность растворения в модели воды и возможность образования эмульсии с нефтью.

Таблица 4 – Результаты физико-химических исследований растворов ПАВ

ПАВ	Растворимость	Тип эмульсии	МФН при ККМ, мН/м	Статическая адсорбция, мкг/г
Лауретсульфат натрия	Растворим	Тип IV	0,01649	1127,5
Бетаин		Тип II	0,02211	914,1
Додецилбензолсульфонат натрия	Опалесценция	Тип IV	0,03499	Исключен высокий МФН
Алкилбензолсульфонат натрия	Осадок	Исключен - нерастворимость в модели воды		
Алкилбензолсульфонат натрия				
Диэтанола-амид лауриновой кислоты	Опалесценция	Нет	Исключен - отсутствие эмульгирования	
Альфа-олефин сульфонат натрия	Растворим	Нет	Исключен - отсутствие эмульгирования	
Олеил бетаин				

Для наилучших ПАВ методом вращающейся капли была установлена зависимость межфазного натяжения на границе с

нефтью от натурального логарифма концентрации, представленная на рисунке 1.

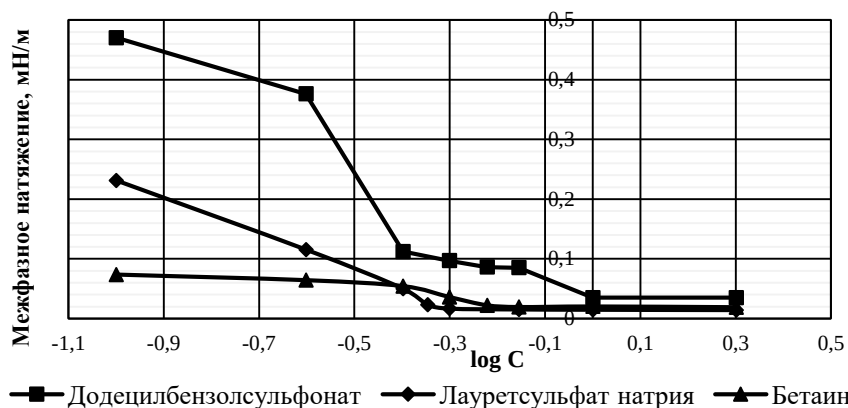


Рисунок 1 – Зависимость МФН на границе «водный раствор ПАВ – нефть» от логарифма концентрации ПАВ при температуре 57 °С

На основании этого установлена критическая концентрация мицеллообразования (ККМ), которая для лауретсульфата натрия составила 0,5 % масс., для бетаина – 0,6 % масс., для додецилбензолсульфоната натрия – 1 % масс. С точки зрения значения межфазного натяжения на границе с нефтью наилучший результат наблюдается у ПАВ на основе лауретсульфата натрия.

Таким образом, по результатам физико-химических исследований для дальнейших экспериментов в составе ПАВ-полимерного раствора был использован лауретсульфат натрия, концентрация которого с учетом значения ККМ и статической адсорбции ПАВ в дальнейших тестах составила 0,7 % масс.

На рисунке 2 представлен график зависимости межфазного натяжения на границе «ПАВ-полимерный состав – нефть» от концентрации полимера (FP 5205 SH) при постоянной концентрации ПАВ (лауретсульфат натрия) 0,7 % масс. Значение МФН при добавлении полимера увеличилось с 0,016 до 0,065 мН/м. Однако порядок значения МФН сохранился, а, следовательно, потенциал ПАВ значительным образом не изменился.

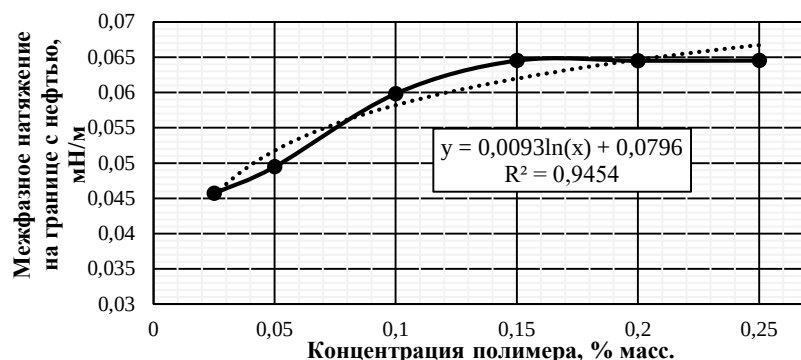


Рисунок 2 –Зависимость МФН на границе «ПАВ-полимерный состав – нефть» от концентрации полимера при концентрации ПАВ 0,7 % масс. (температура 57 °С)

На рисунке 3 представлен график зависимости эффективной вязкости раствора, содержащего 0,175 % масс. полимера марки FR 5205 SH, от концентрации ПАВ (лауретсульфат натрия), по которому можно сделать вывод, что влияние ПАВ на эффективную вязкость состава незначительно (снижение эффективной вязкости менее 10%).

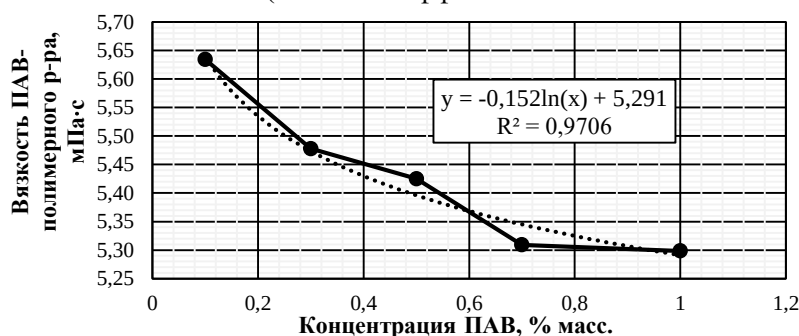


Рисунок 3 -Зависимость эффективной вязкости ПАВ-полимерного состава (концентрация полимера - 0,175 %) от концентрации ПАВ при скорости сдвига 122,3 с⁻¹ (температура 57 °С)

Таким образом, добавление анионного ПАВ (лауретсульфат натрия) в концентрации 0,7 % масс. и частично-гидролизованного полиакриламида (молекулярная масса составляет 12,7 млн Да, с добавлением сульфонированной добавки на основе акриламид-трет бутиловой кислоты) в концентрации 0,175 % масс. к модели

закачиваемой в пласт воды системы ППД позволяет снизить межфазное натяжение на границе «ПАВ-полимерный состав-нефть» до значения 0,065 мН/м и увеличить эффективную вязкость закачиваемого агента до значения 5,31 мПа·с (температура 57 °С и скорость сдвига 122,3 с⁻¹).

2. Выявленная с помощью физического и гидродинамического моделирования способность разработанного состава повышать нефтеотдачу моделей пласта позволила обосновать технологию извлечения остаточной нефти при заводнении неоднородных терригенных коллекторов.

На первом этапе была произведена оценка эффективности разработанного состава в рамках фильтрационных экспериментов на образцах керна объекта исследования. В ходе эксперимента определялись фильтрационные характеристики разработанного ПАВ-полимерного состава, а также оценивался потенциал дополнительного вытеснения нефти. Исходные данные и результаты фильтрационных исследований представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты фильтрационных исследований ПАВ-полимерного состава

Параметр	Тест №1	Тест №2	Тест №3
Длина/диаметр образца керна, см	3,37/ 3,02	3,17/ 3,00	3,07/ 3,01
Открытая пористость, %	22,12	24,5	25,63
Проницаемость образца керна, мкм ²	0,075	0,116	0,069
Концентрация полимера/ПАВ, % масс.	0,175/0,7		
Квыт (по воде), д.ед.	0,54	0,56	0,37
Квыт (после закачки полимера), д.ед.	0,63	0,67	-
Прирост Квыт, д.ед.	0,09	0,11	-
ФС (после полимера)	11,39	8,05	-
Квыт (после закачки ПАВ-полимерного состава), д.ед.	0,86	0,91	0,53
Прирост Квыт, д.ед.	0,22	0,24	0,15
ФС (ПАВ-полимерный состава)	8,62	5,24	1,27

В экспериментах № 1 и № 2 закачка растворов проводилась до полной обводненности продукции на выходе из кернодержателя,

в эксперименте № 3 после вытеснения нефти водой закачивались полимерный раствор и ПАВ-полимерный состав оторочками по 0,5 порового объема, после чего проводилось вытеснение водой до полной обводненности добываемой продукции. Разработанный ПАВ-полимерный состав позволяет увеличивать коэффициент вытеснения нефти на 0,15-0,24 д.ед. Переход от полимерного раствора на ПАВ-полимерный состав сопровождается снижением фактора сопротивления (давления закачки) на 2,77-2,82.

На следующем этапе производилась оценка эффективности разработанного состава на геолого-гидродинамической модели с рядной системой заводнения, имитирующей по своим характеристикам исследуемый объект внедрения. Для оценки эффективности разработанного состава производился расчет базового варианта (вытеснение нефти водой, КИН=38,08 %) и расчет различных комбинаций закачек полимерной и ПАВ-полимерной оторочек – рассмотрена различная последовательность и объемы оторочек. На рисунке 4 представлена зависимость прироста КИН от порового объема закачки ПАВ-полимерной оторочки для 2-х сценариев (1 сценарий – закачка ПАВ-полимерной оторочки производится после полимерной оторочки; 2 сценарий - закачка ПАВ-полимерной оторочки осуществляется до закачки полимерной оторочки).

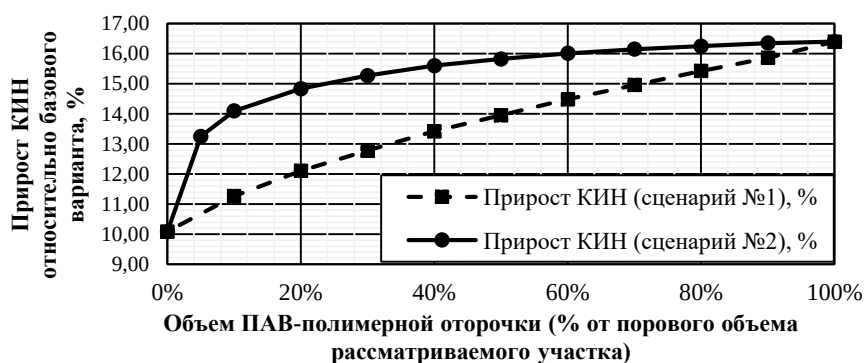


Рисунок 4 - Прирост КИН относительно базового варианта в зависимости от порового объема закачки ПАВ-полимерной оторочки

С точки зрения прироста КИН сценарий, в котором закачка начинается с ПАВ-полимерной оторочки, является наиболее приемлемым. Вне зависимости от сценария прирост КИН напрямую зависит от объема закачки ПАВ-полимерной оторочки и достигает своего пикового значения 0,164 д.ед. при максимальных объемах закачки ПАВ-полимерной оторочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи по повышению степени извлечения нефти из неоднородных терригенных коллекторов при их заводнении.

По результатам диссертационного исследования были сделаны основные выводы:

1. Одним из крупнейших активов, находящимся на поздней стадии разработки в Западно-Сибирской НПП, являются пласты алымской и ванденской свиты, сложенные неоднородными терригенными коллекторами. В качестве потенциального метода увеличения нефтеотдачи для этих объектов может рассматриваться внедрение технологии полимерного и ПАВ-полимерного заводнения.

2. Для разработки эффективного ПАВ-полимерного состава, сохраняющего свои свойства в рассматриваемых геолого-физических условиях и обеспечивающего прирост коэффициента вытеснения нефти, были сформированы критерии применимости и предложена программа экспериментальных исследований.

3. Для повышения эффективности заводнения неоднородных терригенных коллекторов разработан и рекомендуется к практическому применению ПАВ-полимерный состав, представляющий собой водный раствор смеси АПАВ (лауретсульфат натрия) и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки.

4. Разработанный состав на основе АПАВ (лауретсульфат натрия) в концентрации 0,7 % масс. и частично-гидролизованного полиакриламида, включающего мономерные сульфонированные добавки, в концентрации 0,175 % масс. улучшает физико-химические и реологические свойства модели закачиваемой в пласт воды системы ППД (снижает межфазное натяжение на границе с нефтью до уровня 10^{-2} мН/м; увеличивает эффективную вязкость до 10 раз).

5. По результатам фильтрационных экспериментов на образцах керна рассматриваемого объекта была установлена способность разработанного ПАВ-полимерного состава увеличивать коэффициент вытеснения нефти на 0,15-0,24 д.ед. По результатам гидродинамического моделирования на секторной модели с рядной системой заводнения установлено, что максимальное увеличение КИН при закачке разработанного ПАВ-полимерного состава составляет 0,164 д.ед.

6. Обоснована технология заводнения неоднородных терригенных коллекторов на поздней стадии разработки, предусматривающая закачку ПАВ-полимерной, полимерной оторочек и воды системы ППД.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с расширением области применения разработанного состава и улучшением его вытесняющих свойств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Подопригора, Д.Г. Текущий уровень и перспективы развития технологий большеобъемных закачек с использованием полимеров для повышения нефтеотдачи / Д.Г. Подопригора, **Р.Р. Бязров**, Е.А. Христич // Вестник евразийской науки. - 2022. – Т.14, № 2. – 20 с. DOI: 10.15862/37nzvn222.

2. Подопригора, Д.Г. Опыт применения и перспективы внедрения технологии полимерного заводнения в неоднородных коллекторах / Д.Г. Подопригора, **Р.Р. Бязров**, Е.А. Христич // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14, № 6. – 19 с. EDN: FOYUDH.

3. Подопригора, Д.Г. Полимерное заводнение: лабораторные исследования образцов частично гидролизированных полимеров в свободных объемах при проектировании внедрения технологии / Д.Г. Подопригора, **Р.Р. Бязров**, Г.Т. Шамсутдинова, Н.А. Онегов, В.В. Галимов // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2024. — № 1(145). — С. 60-66.

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

4. Palyanitsina, A. Environmentally safe technology to increase efficiency of high-viscosity oil production for the objects with advanced water cut / A. Palyanitsina, E. Safiullina, **R. Byazrov**, D. Podoprigora, A. Alekseenko // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, №. 3. – p. 753. DOI: 10.3390/en15030753.

5. Podoprigora, D.G. The comprehensive overview of large-volume surfactant slugs injection for enhancing oil recovery: status and the outlook / D.G. Podoprigora, **R.R. Byazrov**, J.A. Sytnik // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, №. 21. – p. 8300. DOI: 10.3390/en15218300.

6. Podoprigora, D. G. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods / D.G. Podoprigora, **R.R. Byazrov**, M.A. Lagutina, D.V. Arabov, V.V. Galimov, D.S. Ermolin // *Advances in Geo-Energy Research*. – 2024. – Vol. 12. – №. 1. – pp. 8-21. DOI: 10.46690/ager.2024.04.02.

7. Podoprigora, D.G. Surfactant–Polymer Formulation for Chemical Flooding in Oil Reservoirs / D.G. Podoprigora, M.K. Rogachev, **R.R. Byazrov** // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, №. 7. – 31 p. DOI: 10.3390/en18071814

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664186 Российская Федерация. Программа расчета основных технологических показателей разработки при внедрении технологии полимерного заводнения. Заявка № 2025662779: заявл. 22.05.2025; опубл. 03.06.2025 / Д.Г. Подопригора, **Р.Р. Бязров**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 61 МБ.