

На правах рукописи



МИНИХАИРОВ ЛЕНАР ИЛФАТОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕИЗВЛЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОВЫРАБОТАННЫХ
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.4 – Разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бугульма – 2024

Работа выполнена в государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт» на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

Научный

руководитель: **Насыбуллин Арслан Валерьевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные

оппоненты: **Мулявин Семён Фёдорович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

Пятибратов Петр Вадимович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», декан факультета «Разработка нефтяных и газовых месторождений»

Ведущая

организация: **ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа**

Защита состоится «30» мая 2024 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 72.1.021.01, созданного на базе Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, улица М. Джалиля, д.32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти и на сайте <http://dis.tatnipi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ирина
Львова

Львова Ирина Вячеславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

При разработке зрелых месторождений, характеризующихся высокой долей трудноизвлекаемых запасов, актуальными являются задачи по разработке и внедрению методов увеличения нефтеотдачи (МУН), которые могут способствовать максимальному извлечению нефти и увеличению продолжительности рентабельной разработки месторождения. Одной из перспективных технологий, способных к решению подобных задач, является технология ПАВ-полимерного заводнения. Месторождения Республики Татарстан (РТ) преимущественно состоят из высоковыработанных объектов, что обуславливает необходимость разработки, адаптации и внедрения технологии ПАВ-полимерного заводнения под определенные пластовые условия. Основным объектом применения технологии ПАВ-полимерного заводнения являются терригенные отложения.

Гидродинамическое моделирование ПАВ-полимерной технологии имеет ряд сложностей и проблем. Вот некоторые из них:

1. Сложности в моделировании многокомпонентных систем: ПАВ-полимерная технология включает в себя растворы полимеров и ПАВ. Моделирование взаимодействия и течения таких многокомпонентных систем требует учета различных физических и химических параметров каждого компонента. В работе показано какие параметры необходимы для корректного моделирования данной технологии МУН.

2. Методика подготовки данных к применению в гидродинамическом моделировании: в работе показано, как верифицировать значения вязкости полимерного раствора в симуляторе и добиться минимальных отклонений от лабораторных значений, а также рассчитывать функцию перехода от ОФП в системе «нефть-вода» к ОФП в системе «нефть-ПАВ-полимерный раствор» на основе данных фильтрационных экспериментов.

3. Экспериментальная верификация: моделирование гидродинамических процессов требует верификации и валидации с помощью лабораторных экспериментов. В работе показана валидация точных экспериментальных данных, полученных в лаборатории, на 1D моделях.

4. Масштабируемость: многие процессы ПАВ-полимерной технологии изучаются в масштабе керна. Моделирование в масштабе пласта требует валидации применимости «прямого» переноса полученных данных в лаборатории на условия «больших» масштабов.

5. Интеграция с другими аспектами процесса: при гидродинамическом моделировании пластовой системы часто требуется учитывать дополнительные факторы, определяемые особенностями оборудования для добычи и закачки, а также технологическими ограничениями системы сбора и подготовки продукции.

В целом, гидродинамическое моделирование ПАВ-полимерной технологии является сложной задачей, требующей учета множества физических, химических и инженерных аспектов процесса для достижения точных и предсказуемых результатов. В диссертационной работе приведен обзор достижений и технологических тенденций по моделированию ПАВ-полимерного заводнения. Для планирования и оценки эффективности ПАВ-полимерного заводнения разработана методика моделирования процесса. Было проведено исследование по влиянию различных параметров на эффективность ПАВ-полимерного заводнения. Разработаны критерии применимости технологии для различных геолого-физических условий.

Разработанность темы диссертации

Вопросы применения химических МУН, в том числе технологии ПАВ-полимерного заводнения, в своих работах освещали многие российские и зарубежные ученые, в числе которых Андреев В.Е., Бакиров И.М., Береговой А.Н., Варфоломеев М.А., Ганиев И.М., Грачев С.И., Гуськова И.А., Зарипов А.Т., Ибатуллин Р.Р., Леонтьев С.А., Мулявин С.Ф., Тананыхин Д.С., Хисаметдинов М.Р., Хисамов Р.С., Gogarty W., Green D., Lake L., Sheng J.

Вопросами гидродинамического моделирования, в том числе моделирования технологий МУН занимались Байков В.А., Булыгин Д.В., Гильманова Р.Х., Грачев С.И., Закиров Э.С., Закревский К.Е., Зейгман Ю.В., Иктисанов В.А., Каневская Р.Д., Котенёв Ю.А., Мухаметшин В.В., Мухаметшин В.Ш., Насыбуллин А.В., Низаев Р.Х., Никифоров А.И., Пятибратов П.В., Сыртланов В.Р., Султанов Ш.Х., Федоров К.М., Хакимзянов И.Н., Хасанов М.М., Хисамов Р.С., Хисамутдинов Н.И., Chen G., Fadili A., Masuda Yo., Pandey A., Satoh T., Verma S.

Цель диссертационной работы

Обоснование параметров ПАВ-полимерного заводнения, обеспечивающих наибольшую эффективность разработки высоковыработанных объектов Ромашкинского нефтяного месторождения.

Основные задачи исследований

1. Уточнить методику подготовки данных к применению в гидродинамическом моделировании ПАВ-полимерной технологии для условий месторождений РТ.

2. Разработать решение по корректному переносу свойств ПАВ-полимерного раствора при моделировании процесса заводнения на разных масштабах (керн, месторождение).

3. Выявить критерии эффективного применения технологии ПАВ-полимерного заводнения в зависимости от геолого-физических параметров на основе расчетов на синтетических гидродинамических моделях для терригенных отложений РТ.

4. На основе исследования влияния критериев применимости ПАВ-полимерного заводнения на эффективность технологии обосновать подходы к определению области эффективного применения ПАВ-полимерного заводнения.

5. Разработать алгоритм выбора объектов разработки и участков для применения технологии ПАВ-полимерного заводнения и оптимального сценария закачки для условий месторождений РТ.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются терригенные продуктивные пласты Ромашкинского месторождения, предметом исследования – процессы фильтрации жидкости в насыщенной поровой среде при воздействии технологией ПАВ-полимерного заводнения.

Научная новизна

1. Разработан комплексный геолого-физический параметр для определения границ применимости технологии ПАВ-полимерного заводнения с использованием трехмерного гидродинамического моделирования, учитывающий проницаемость пласта, вязкость нефти, выработанность запасов и объем закачки раствора.

2. Установлена степенная зависимость увеличения дополнительной добычи нефти, приходящуюся на 1 тонну закачанной химии при ПАВ-полимерном заводнении с увеличением подвижности нефти для условий объектов разработки РТ (в диапазонах по вязкости 6-96 мПа^{*}с, проницаемости – 0,25-1,5 мкм²).

3. Установлена степенная зависимость увеличения КИН от применения технологии ПАВ-полимерного заводнения с увеличением выработанности запасов (до 75%) на начало закачки ПАВ-полимерного раствора для условий высокой проницаемости (до 1,5 мкм²) и низкой вязкости нефти (6 мПа^{*}с).

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм гидродинамического моделирования ПАВ-полимерного заводнения, состоящий из последовательности построения линейных моделей керна, масштабирования результатов линейных моделей с «мелкой» ячейкой на «крупные», построения и адаптации к истории разработки ГДМ участка

применения технологии и прогнозирования эффекта от технологии ПАВ-полимерного заводнения.

2. Разработана методика моделирования ПАВ-полимерного заводнения, использующаяся в учебном процессе АГНИ для подготовки магистров по направлению «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений».

3. Обоснован метод определения оптимальных сценариев ПАВ-полимерного заводнения на месторождениях высоковязкой нефти РТ с использованием трехмерного гидродинамического моделирования. Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертационной работы, могут быть использованы для повышения достоверности гидродинамических расчетов при применении технологии на месторождениях РТ.

4. По теме диссертации получены 1 патент на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

- 4.1. №2802645 – Способ увеличения нефтеотдачи пласта.
- 4.2. №2022664978 – Программа для автоматизации алгоритма циклической закачки ПАВ-полимерной композиции в ПО «tNavigator».
- 4.3. №2021680263 – Анализ нагнетательных скважин для МУН в КИС «АРМИТС».

Методология и методы исследований

При решении поставленных задач использовались лабораторные и вычислительные эксперименты. Решение поставленных задач базируется на теоретических, экспериментальных исследованиях и промысловых данных. Оценка влияния критериев применимости ПАВ-полимерного заводнения на эффективность выработки запасов проводилась на основе трехмерного гидродинамического моделирования с применением программного обеспечения «тНавигатор».

Основные защищаемые положения:

1. Дополнительная добыча нефти, приходящаяся на 1 тонну закачанной химии при ПАВ-полимерном заводнении увеличивается в степенной зависимости с ростом значений подвижности нефти для условий объектов разработки РТ (в диапазонах по вязкости 6-96 мПа*с, проницаемости – 0,25-1,5 мкм²).

2. КИН при ПАВ-полимерном заводнении увеличивается в степенной зависимости с ростом значений выработанности запасов (до 75%) на начало закачки ПАВ-полимерного раствора для условий высокой проницаемости (до 1,5 мкм²) и низкой вязкости нефти (6 мПа*с).

3. Предложенный комплексный геолого-физический параметр, полученный с использованием трехмерного гидродинамического моделирования, обеспечивает

определение границ применимости технологии ПАВ-полимерного заводнения с учетом проницаемости продуктивного пласта, вязкости нефти, выработанности запасов нефти и объема закачки раствора

4. Усовершенствованная схема моделирования ПАВ-полимерного заводнения, заключающаяся в последовательности построения линейных моделей керна, масштабирования результатов линейных моделей с «мелкой» ячейкой на «крупные», построения и адаптации к истории разработки ГДМ участка применения технологии, обеспечивает корректное прогнозирование эффекта технологии ПАВ-полимерного заводнения.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается применением утвержденных методик и ГОСТ лабораторных исследований, использованием лицензионного программного обеспечения и подтверждается сопоставлением модельных, лабораторных и промысловых данных.

Публикации и апробация результатов работы

Основное содержание и результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах различного уровня:

- Бизнес-семинар «Геология и разработка» (г. Альметьевск, 04.08.2023 г.),
- Научно-практическая конференция «Геология и инновации. Проблемы и пути их решения» (г. Бугульма, 21.10.2022 г.),
- VI международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 26.11.2021 г.),
- семинаре кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» АГНИ (г. Альметьевск, 20.10.2021 г.),
- XXI Европейский симпозиум по увеличению нефтеотдачи EAGE (г. Вена, Австрия, 19-22.04.2021 г.),
- III научно-практическая конференция «Горизонтальные скважины» EAGE (г. Калининград, 27-31.05.2019 г.),
- Мировой конгресс и выставка по тяжелой нефти (г. Маскат, Оман, 03-05.09.2018 г.).

По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ в том числе: 6 в рецензируемых научных журналах и в изданиях, входящих в международную базу Scopus, 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 2 публикации в других изданиях.

Личный вклад автора

В основу диссертации положены основные результаты научных исследований, выполненных автором в период 2019–2023 гг. Автором собрана и обработана информация по геолого-физическими параметрам, запасам и свойствам нефти, разрабатываемых месторождений РТ, выполнена математическая обработка на основе статистического анализа и статистический анализ полученных результатов.

В исследованиях по определению свойств ПАВ-полимерного раствора, вошедших в диссертацию, автору принадлежит роль в постановке задач, формулировке целей и задач экспериментов, анализе и интерпретации их результатов.

Автором работы проведены все численные расчеты и анализ результатов. На основе результатов численного моделирования и аналитического исследования осуществлено множество вариантов расчета технологии ПАВ-полимерного заводнения на различных месторождениях с различными геолого-физическими характеристиками. Определены параметры применения технологии ПАВ-полимерного заводнения с оценкой потенциала тиражирования и масштабирования технологии.

Основной целью цикла работ, выполненных автором, была реализация комплексного подхода к исследованию физических процессов, протекающих в коллекторе при ПАВ-полимерном заводнении, и их учет при реализации ПАВ-полимерного заводнения на месторождениях РТ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 196 наименований, и содержит 120 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 16 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю – доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Насыбуллину Арслану Валерьевичу за ряд ценных идей, использованных в работе, за особое постоянное внимание к работе и неоценимую поддержку, своевременные советы и наставления.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов.

В первом разделе содержится литературный обзор по теме диссертации: описана структура запасов месторождений Республики Татарстан, физические процессы, протекающие при применении ПАВ-полимерного заводнения, обзор реализации проектов ПАВ-полимерного заводнения по всему миру и подходы к моделированию технологии ПАВ-полимерного заводнения.

Анализ технологии ПАВ-полимерного заводнения показал недостаточную изученность влияния различных геолого-физических и технологических параметров на эффективность ПАВ-полимерного заводнения для условий месторождений РТ. В связи с этим автором были сформулированы задачи исследований по разработке методики моделирования воздействия, изучения зависимостей эффективности технологии от различных параметров и разработке алгоритма выбора объектов и участков для применения ПАВ-полимерного заводнения.

Во втором разделе приводится анализ комплекса лабораторных исследований, при реализации которого определяются оптимальные марки ПАВ и полимера, описываются фильтрационные исследования на естественных образцах керна (Таблица 1) и приводится перечень необходимых параметров для моделирования ПАВ-полимерного заводнения и процесс подготовки и верификации значений для этих параметров.

На основе полученных лабораторных исследований произведена проверка на соответствие рассчитанных свойств в гидродинамическом симуляторе и измеренных значений.

При моделировании ПАВ-полимерного заводнения в гидродинамическом симуляторе тНавигатор учтены величины адсорбции ПАВ и полимера породой в зависимости от концентрации ПАВ и полимера соответственно, изменение вязкости вытесняющего агента в зависимости от концентрации полимера, изменение вязкости вытесняющего агента в зависимости от скорости потока, параметр смешиаемости, коэффициент остаточного сопротивления породы, недоступный поровый объем для полимерного раствора, изменение межфазного натяжения в зависимости от концентрации ПАВ, изменение вязкости вытесняющего агента в зависимости от концентрации ПАВ, ОФП в системе «нефть – раствор ПАВ», кривая капиллярного разбавления ПАВ.

Все вышеперечисленные свойства оценены в ходе лабораторных экспериментов. При описании изменения вязкости полимерного раствора от скорости потока замечен разный градиент при разных концентрациях. Для учета этого явления разработано решение по расчету соответствующих коэффициентов и верификации рассчитанных значений в симуляторе с исходными данными (Рис. 1).

Таблица 1 – Средние значения основных фильтрационно-емкостных показателей моделей пласта (составной керн 48 см) и результаты проведенных фильтрационных экспериментов с использованием нефти вязкостью 30,2 мПа*с и ПАВ-полимерной композиции.

№ серии	1	2	3	4	5
Объем пор, см ³	72,4	74,3	80,5	78,9	85,2
Пористость, %	23,5	23,8	24,9	25,1	27,5
Начальная фазовая проницаемость по воде, мкм ² ·10 ⁻³	1051	1509,5	1137,6	763,4	809
Коэф. вытеснения нефти водой, %	38,1	47,8	41,3	35,2	43,2
Концентрация ПАВ, %	Y	2Y	Y	2Y	3Y
Концентрация полимера, %	X	X	1,5X	1,5X	1,5X
Вязкость ПАВ-полимерного раствора, мПа·с	28,78	30,7	37	39,1	42,8
Межфазное натяжение, мН/м	0,11	0,12	0,15	0,14	0,14
Общий прирост коэффициента вытеснения нефти, %	35,4	34,7	32,3	37,6	36,1
Конечный коэффициент вытеснения нефти, %	73,5	82,4	73,6	72,9	79,3

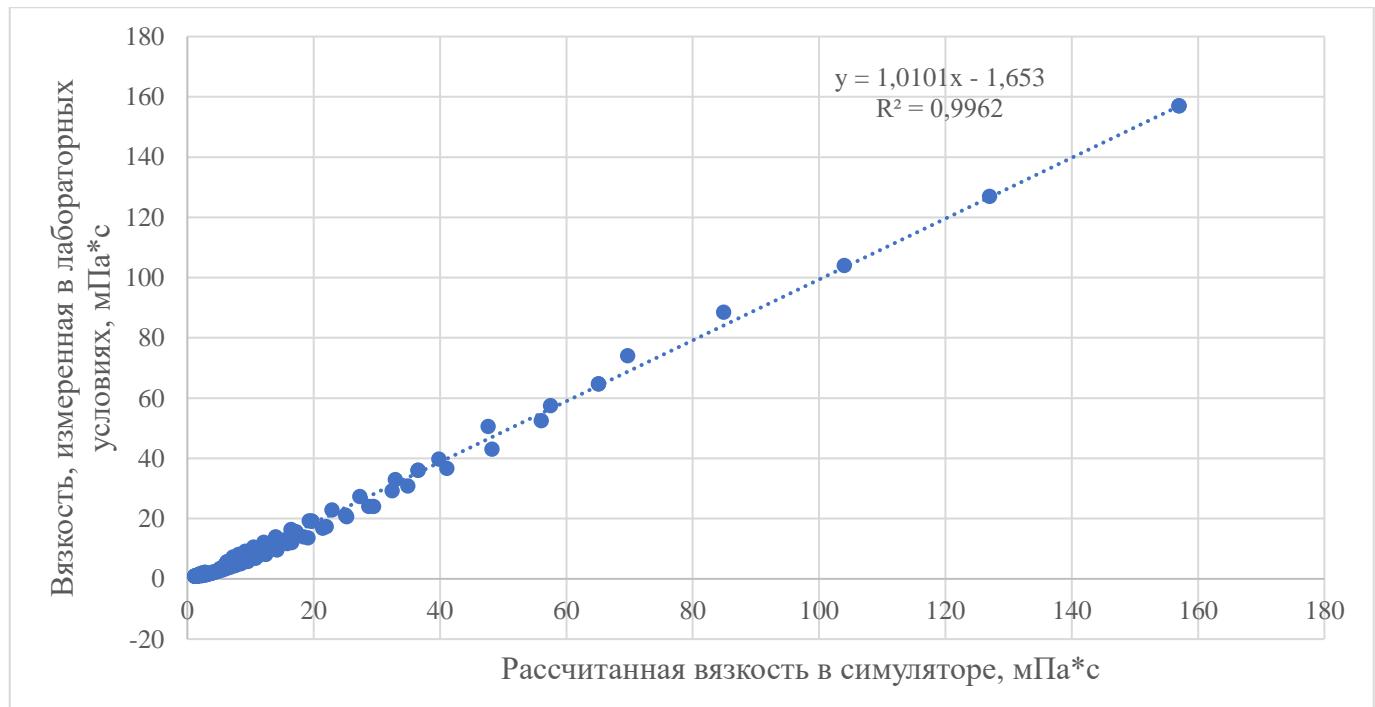


Рисунок 1 – Кросс-плот лабораторных результатов измерений вязкости и расчетных значений в симуляторе

Кривая капиллярного разбавления ПАВ представляет собой зависимость коэффициента смешиаемости от логарифма капиллярного числа (Рис. 2), с помощью которой описывается переход относительных фазовых проницаемостей в системе «нефть – вода» к системе «нефть – раствор ПАВ-полимера» по формуле:

$$S_{ori} = \omega \cdot S_{or}^{EOR} + (1 - \omega)S_{or}^{o-w}$$

где ω – коэффициент смешиаемости, д.ед.; S_{ori} – текущая остаточная нефтенасыщенность, д.ед; $^{o-w}$ – система «нефть – вода», д.ед.; EOR – система «нефть – раствор ПАВ».

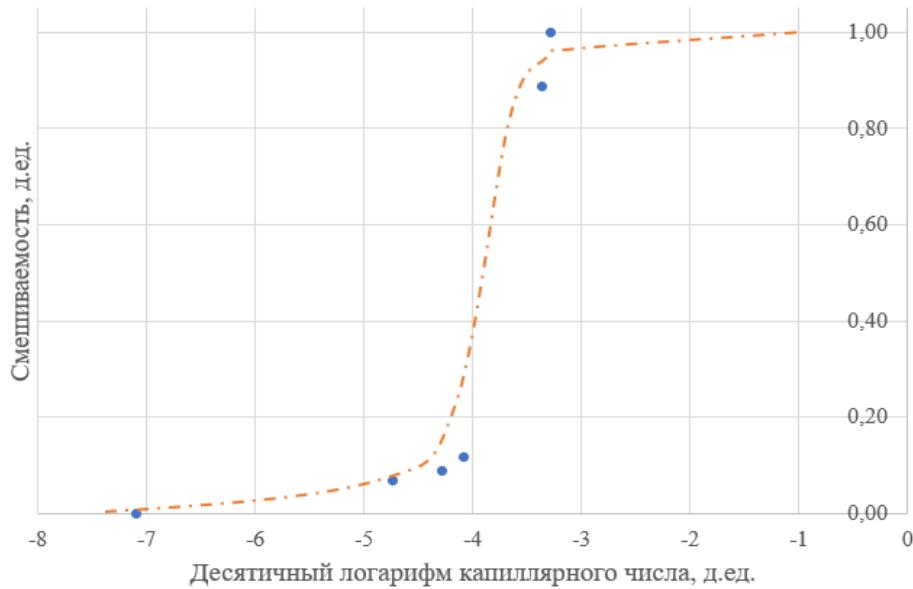


Рисунок 2 – Кривая капиллярного разбавления ПАВ. Маркерами отмечены значения смешиаемости, пересчитанные по приведенной формуле

Для снижения степени неопределенности при задании свойств ПАВ-полимерного раствора, а также повышения качества гидродинамического моделирования, были построены линейные модели керна в масштабе 1:1, на которых воспроизводились фильтрационные исследования. Исходя из полученных результатов, представленных в таблице 2, использование перечня вышеперечисленных параметров для описания ПАВ-полимерной композиции достаточно для воспроизведения фильтрационных исследований на гидродинамической модели керна.

Таблица 2 – Итоговые результаты моделирования фильтрационных экспериментов.

Фильтрационные эксперименты	1 этап	2 этап	3 этап
	Закачка воды	Закачка ПАВ-ПАА	Закачка воды
Прокаченный поровый объем, д.ед.	1	1	2
Отклонение результатов ГДМ от фильтрационных исследований, %			
Квят, %	0,03	0,9	0,3
Прирост Квят, %	-	1,2	-1,2

Однако, параметры, применяющиеся для описания ПАВ-полимерной композиции в ГДМ керна, требуют верификации описания процесса при переходе на ГДМ с «крупной» ячейкой, т.к. могут быть расхождения в результатах в ГДМ месторождения из-за разности в масштабах модели. ГДМ керна с размером ячейки 1 см и ГДМ модели с размером ячейки 50 м будут по-разному воспроизводить эффекты из-за разбавления концентрации ПАВ-полимерного состава на крупной ячейке, т.к. каждой концентрации раствора соответствует определённая технологическая эффективность, поэтому необходимо проверять эффекты от МУН при смене масштабов моделирования. В случае получения разных эффектов проводится масштабирование. Сравнение полученных результатов показано в Таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение Квят моделей керна и масштабированной.

№ этапа	Название этапа	Квят масштабированной модели, %	Квят модели керна, %	Отклонение, %
1	Вытеснение водой	33,98	34,32	0,34
2	Вытеснение ПАВ-полимерным раствором	71,10	71,10	0
3	Довытеснение водой	73,03	73,23	0,2

Таким образом, доказана необходимость проведения моделирования фильтрационных исследований на керне и проведения масштабирования на размер ячейки, соответствующей размеру ячейки полномасштабной модели, перед моделированием ПАВ-полимерного заводнения в масштабах месторождения.

В третьем разделе приводится анализ факторов, существенно влияющих на эффективность ПАВ-полимерного заводнения. Для решения задач по определению влияния фильтрационно-емкостных свойств, времени начала закачки ПАВ-полимерного раствора и выявления зависимостей между параметрами были

построены синтетические гидродинамические модели с пятиточечной системой размещения скважин.

С целью выявления влияния различных параметров на эффективность закачки ПАВ-полимерного раствора были использованы 5 значений по проницаемости и 3 значения по вязкости нефти (Таблица 4). Другими изменяющимися параметрами являются время начала закачки ПАВ-полимерного раствора, концентрации хим. продуктов и их объемы.

Таблица 4 – Основные характеристики синтетической ГДМ.

Параметр	Значение
Пористость, д.ед.	0,20
Проницаемость, мкм ²	0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5
Вязкость нефти, мПа*с	6; 24; 96
Начальное пластовое давление, МПа	115
Пластовая температура, °С	25
Поровый объем, тыс. м ³	759,38
Сетка скважин, м	250*250
Концентрация полимера, %	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25
Концентрация ПАВ, %	0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5
% Закачки хим. продуктов от порового объема	10; 30; 50; 70; 100

Одними из наиболее важных параметров коллектора, определяющих стратегии разработки, являются проницаемость коллектора и вязкость насыщающего его флюида. Это подтверждается и на синтетических моделях – при прочих равных условиях чем выше подвижность нефти, тем выше дополнительная добыча нефти от ПАВ-полимерного заводнения (Рис. 3).

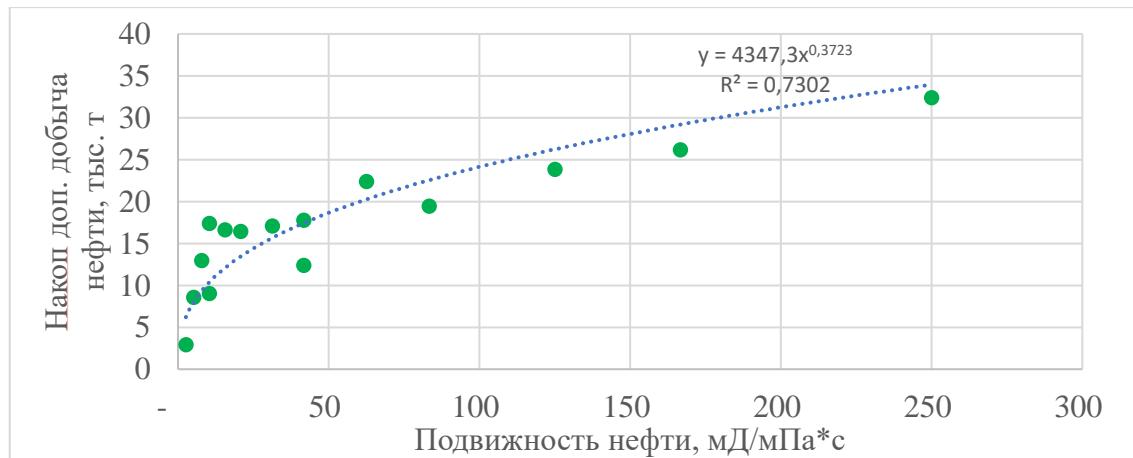


Рисунок 3 – Зависимость накопленной дополнительной добычи от подвижности нефти

Что касается количества хим. продуктов, необходимых для ПАВ-полимерного заводнения, то при прочих равных условиях чем выше подвижность нефти, тем меньшая масса реагентов нужна для получения максимального эффекта (Рис. 4).

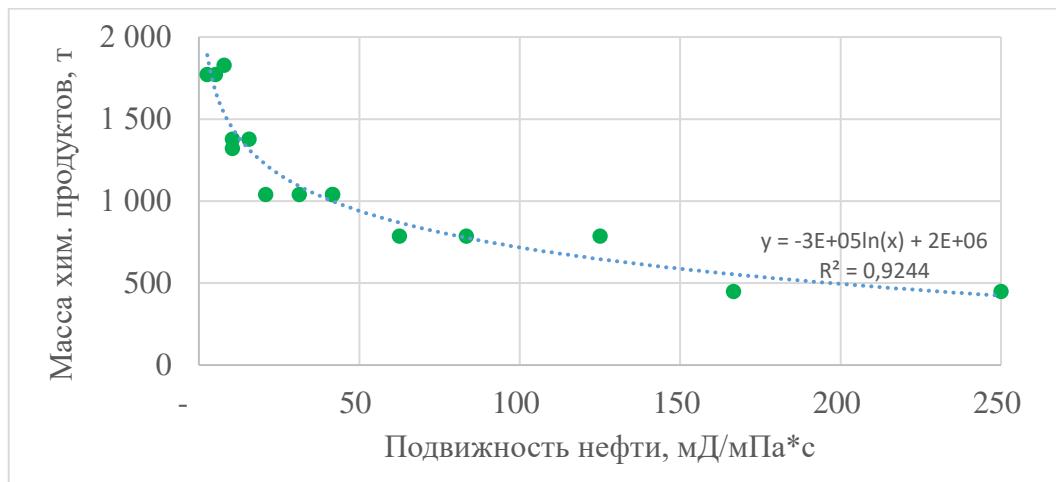


Рисунок 4 – Зависимость необходимой массы хим. продуктов от подвижности нефти

Был проведен анализ влияния выработанности запасов на эффективность применения технологии ПАВ-полимерного заводнения (Рис. 5 и 6). Были выбраны две одинаковые гидродинамические модели, единственным отличием которых была дата начала закачки выбранной оторочки ПАВ-полимерной композиции (концентрации ПАВ и полимера 0,5% и 0,05% соответственно, размер оторочки 0,3 д.ед. порового объема) в течении одного года: в одном случае этой дате соответствовала выработанность 74% (после 20 лет разработки), в другом – 17,5% (после 2 лет разработки).

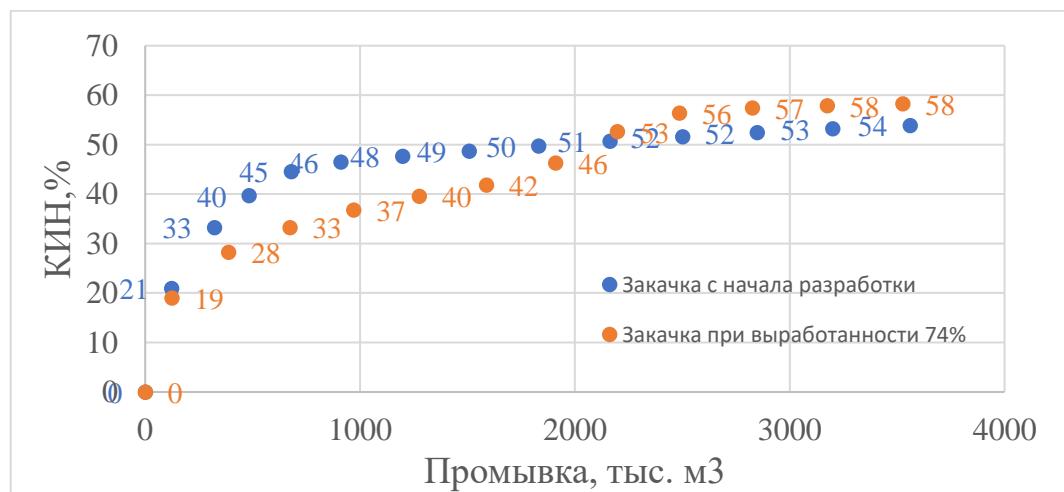


Рисунок 5 – Изменение КИН при разных датах начала закачки ПАВ-полимерной оторочки

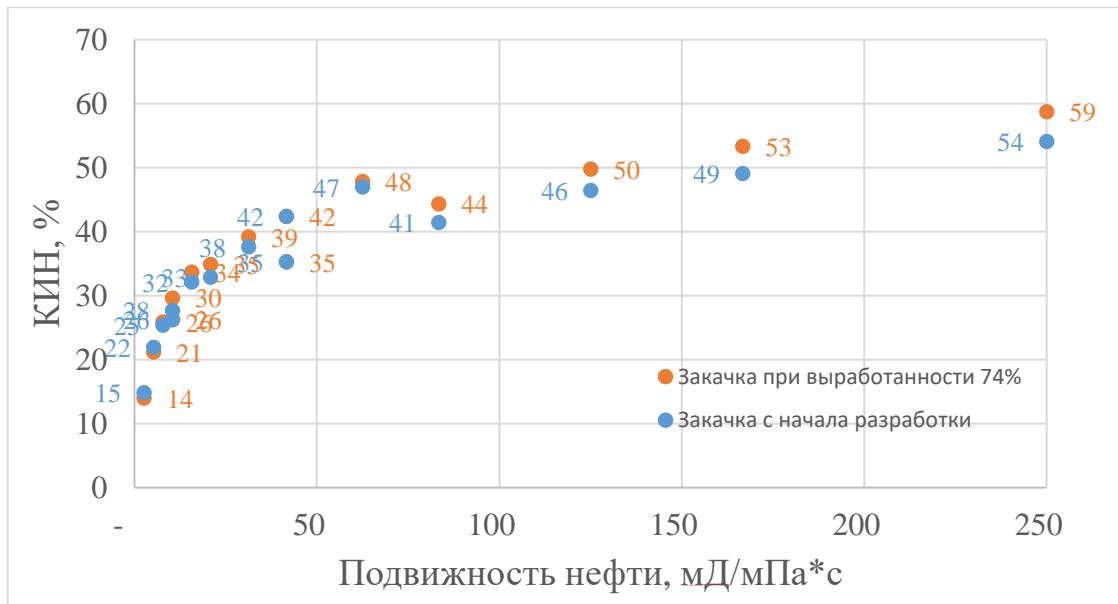


Рисунок 6 – Сравнение конечных КИН при разных датах начала закачки ПАВ-полимерного заводнения

Из Рисунков 5 и 6 сделаны следующие выводы:

1. При закачке раствора при низкой выработанности запасов КИН краткосрочно становится выше, до начала получения эффекта от закачки раствора при высокой выработанности запасов.
2. Конечный КИН в варианте закачки раствора при низкой выработанности ниже, чем в варианте при закачке раствора при высокой выработанности.
3. Зависимость конечного КИН от подвижности нефти (Рис. 6) показывает получение более низкого КИН для вариантов с закачкой раствора при низкой выработанности, по сравнению с вариантами закачки при высокой выработанности.

Такое поведение зависимостей (Рис. 5 и 6) объясняется тем, что при закачке ПАВ-полимерного раствора с начала разработки происходит интенсификация добычи нефти за счет уменьшения прорывов воды (воздействие полимером) и изменения смачиваемости (воздействие ПАВ), однако, воздействия на остаточную нефть в полной мере не происходит, т.е. тот же объем нефти будет добыт с использованием воды с течением большего периода по времени.

Для формирования комплексного критерия применимости ПАВ-полимерного заводнения первым этапом проведена нормализация критериев, т.е. приведение критериев к единой шкале от 0 до 1. Для этого применялось следующее выражение:

$$F(p_i) = \frac{Q(p_i)}{Q_{max}}$$

где $F(p_i)$ – значение нормализованного параметра p , $Q(p_i)$ – исходное значение параметра p , Q_{max} – максимальное из всех значений параметра p .

1. Аппроксимация критерия $F_{k/\mu}$ - дополнительной добычи нефти от k/μ :

$$F_{k/\mu} = \begin{cases} y = 0,127 \ln(k/\mu) + 0,0743, & k/\mu < 50 \\ y = 0,2436 \ln(k/\mu) - 0,4035, & k/\mu \geq 50 \end{cases}$$

где k/μ - отношение проницаемости к вязкости нефти.

2. Аппроксимация критерия F_{or} - дополнительной добычи нефти от выработанности запасов:

$$F_{or} = \begin{cases} y = 1,1504 or + 0,0073, & or < 0,50 \\ y = 1,9359 or - 0,4564, & or \geq 0,50 \end{cases}$$

где or – выработанность запасов нефти на момент начала ПАВ-полимерного заводнения.

3. Аппроксимация критерия F_{inj} – дополнительной добычи нефти от закачанного объема раствора в д.ед. от порового.

$$F_{inj} = \begin{cases} y = 0,60001 V^{1,2622}, & \mu_n = 6 \text{ мПа} * \text{с} \\ y = 0,7753 V^{1,3007}, & \mu_n = 24 \text{ мПа} * \text{с} \\ y = 0,8247 V^{1,1034}, & \mu_n = 96 \text{ мПа} * \text{с} \end{cases}$$

где V – объем закачки в д.ед. от порового объема, μ_n – вязкости нефти в пластовых условиях.

Вышеописанный анализ наглядно демонстрирует наличие влияния геолого-физических параметров пласта на успешность ПАВ-полимерной технологии. Для получения комплексного параметра применения технологии ПАВ-полимерного заводнения предлагается воспользоваться мультиплексивной сверткой:

$$F_c = \sqrt[3]{F_{or} \cdot F_{k/\mu} \cdot F_{inj}}$$

где F_c – комплексный геолого-физический параметр применения технологии ПАВ-полимерного заводнения, F_{or} - дополнительная добыча нефти от выработанности запасов, $F_{k/\mu}$ - дополнительная добыча нефти от подвижности нефти, F_{inj} – объем закачки в д.ед. от порового объема ПАВ-полимерного раствора.

В результате проведения нормализации полученных результатов по параметрам и их осреднения предложен комплексный геолого-физический параметр применимости технологии ПАВ-полимерного заводнения. Наличие такого критерия

позволяет выполнить экспресс-оценку применимости технологии на интересуемом объекте разработки.

В четвертом разделе приводится общее описание процедуры верификации работы. Процесс планирования ПАВ-полимерного заводнения состоял из следующих этапов:

1. Разработка критериев применимости технологии и выбор участка.
2. Подбор реагентов, лабораторные исследования их свойств.
3. Фильтрационные исследования на керне и их моделирование.
4. Масштабирование результатов фильтрационных исследований.
5. Гидродинамическое моделирование участка заводнения ПАВ-полимерным раствором.
6. Проведение многовариантных расчетов для определения оптимального сценария химического заводнения.
7. Анализ полученных результатов, ТЭО.

Первичная разработка критериев составлена на основе обзора литературы, которая затем уточнялась. По разработанному алгоритму выбора участка для ПАВ-полимерного заводнения ранжировались участки. Затем на основе выполненных лабораторных и фильтрационных исследований на керне, их моделирования и масштабирования результатов фильтрационных исследований проводилось гидродинамическое моделирование ПАВ-полимерного заводнения и анализ полученных результатов.

Для наиболее достоверного моделирования процесса закачки выполнена экспертиза геологической модели и адаптация гидродинамической модели к истории разработки. Расхождение основных расчетных параметров в ГДМ от фактических данных составляет не более 5% (по дебиту жидкости – 0%), что свидетельствует о высоком качестве исходной модели (Рис. 7).

После того, как были достигнуты удовлетворительные результаты адаптации ГДМ к истории разработки, следующим этапом стало моделирование прогнозных вариантов.

Для получения возможных вариантов прогноза и оценки технологической эффективности полимерного заводнения в будущем, на ГДМ подобранныго участка были выполнены прогнозные расчеты.

При проведении расчетов на ГДМ были заданы следующие параметры:

1. Постоянная приемистость нагнетательных скважин;
2. Объем закачки и концентрация полимера подбиралась в ходе расчетов;
3. Максимальное забойное давление закачки - 25 МПа.

4. Постоянная депрессия на добывающих скважинах;
5. Экономические ограничения на закрытие добывающих скважин - по обводненности 98%, по минимальному дебиту нефти 0,5 т/сут.

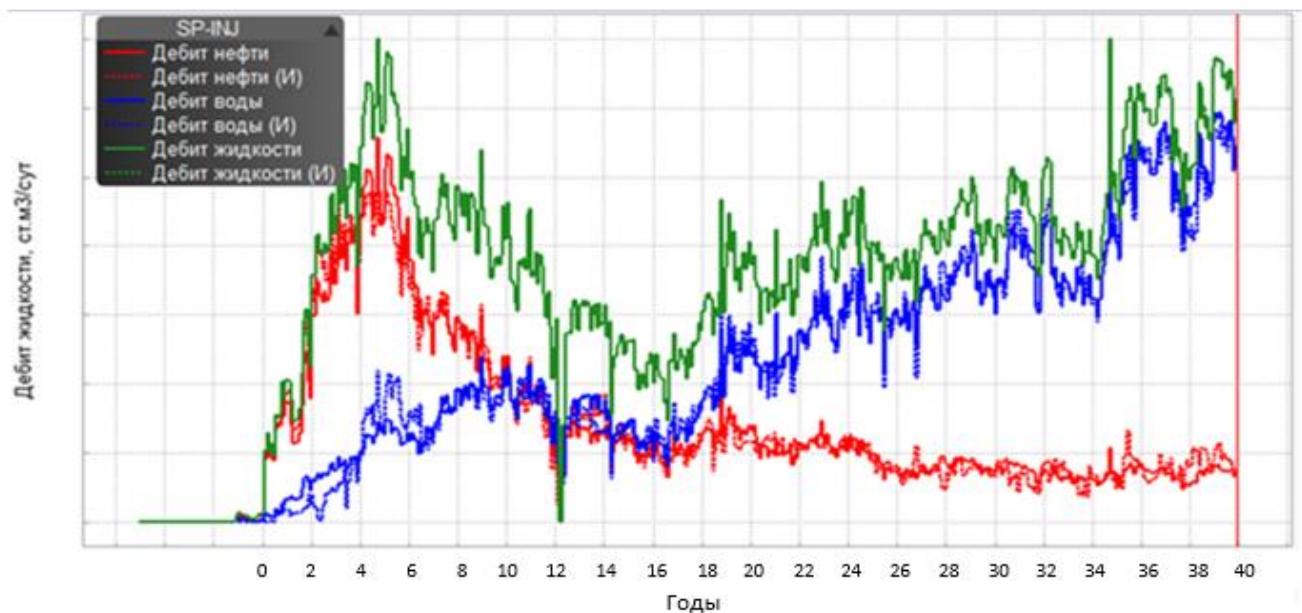


Рисунок 7 – Адаптация дебитов нефти (красная пунктирная линия – фактические значения, красная сплошная – расчетные), воды (синяя пунктирная линия – фактические значения, синяя сплошная – расчетные) и жидкости (зеленая пунктирная линия – фактические значения, зеленая сплошная – расчетные) по участку

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается аprobированием результатов моделирования путем сравнения прогнозных и фактических показателей по добыче нефти (Рисунок 8).

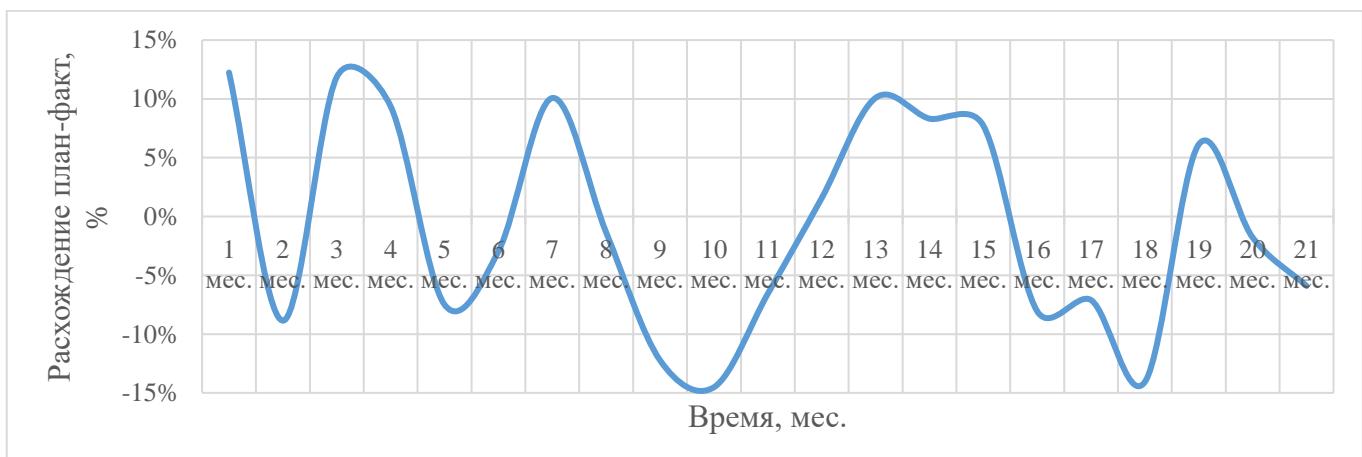


Рисунок 8 - Сравнение плановых и фактических показателей по добыче нефти

Как видно из рисунка, в основном, расхождение показателей располагаются в 10% коридоре, что свидетельствует о высоком качестве прогноза.

С учетом принятых для расчета условий были рассчитаны различные сценарии ПАВ-полимерного заводнения (Рисунок 8), учитывающие изменения в объемах закачки, концентрациях закачки и очередности закачки компонентов. Результаты прогнозных вариантов заводнения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Прирост КИН прогнозных расчетов ПАВ-полимерного заводнения.

Поровый объем, %	ПАВ: X% ПАА: Y%	ПАВ: 2X% ПАА: Y%	ПАВ: X% ПАА: 1,5Y%	ПАВ: 2X% ПАА: 1,5Y%
0,1	0,04%	0,04%	0,05%	0,05%
1	0,33%	0,31%	0,45%	0,45%
5	1,67%	2,10%	2,19%	2,48%
10	3,31%	4,61%	3,98%	5,01%
20	6,15%	8,21%	6,56%	8,35%
30	8,27%	11,35%	8,58%	11,58%

Таким образом, как и ожидалось, с увеличением объемов и концентраций химических продуктов, дополнительная добыча нефти возрастает и достигает максимальных значений при сценарии с прокачиваемым поровым объемом равным 30%, концентрацией ПАВ – 2X% и концентрацией полимера – 1,5Y%. Однако для того, чтобы выбрать наиболее привлекательный вариант с точки зрения экономики были проведены расчеты технико-экономического обоснования (ТЭО) для всех сценариев и построен соответствующий график (Рис. 9).

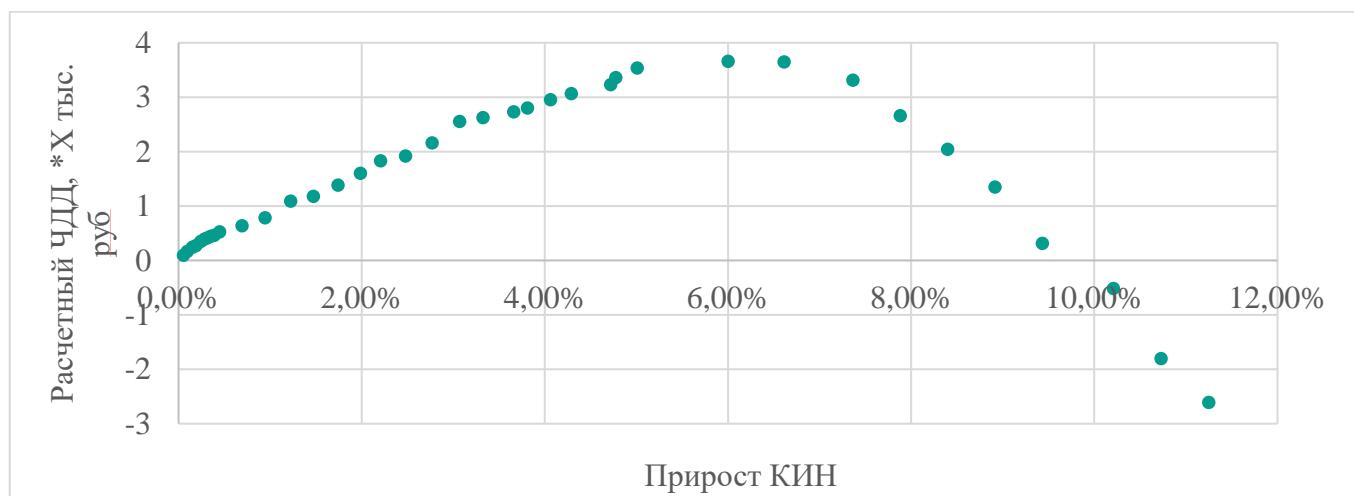


Рисунок 9 – Сравнение приростов КИН от расчетного ЧДД для различных объемов закачки (для варианта: ПАВ – X%, ПАА – Y%).

Технологическая эффективность растет с увеличением объемов закачки, однако, прирост добычи нефти с определенных значений по накопленной закачке химических продуктов не перекрывает расходы на закачку, согласно рассчитанного ТЭО. Такой подход к оценке привлекательности вариантов закачки позволяет выбрать наиболее эффективный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные лабораторные исследования и фильтрационные эксперименты свидетельствуют о технологической эффективности ПАВ-полимерного заводнения для условий терригенных коллекторов месторождений РТ. В рамках проведенных лабораторных исследований и их подготовки к применению в гидродинамической модели уточнена методика подготовки данных, а именно предложен алгоритм подбора и проверки корректности подбора коэффициента сдвиговой вязкости, необходимый для задания в ГДМ. Продемонстрирован метод описания перехода от ОФП в системе «вода – нефть» к системе «ПАВ-полимерный раствор – нефть» с помощью кривой капиллярного осушения.

2. Проведенные работы на 1D-модели свидетельствуют о корректном описании эффектов ПАВ-полимерного заводнения в гидродинамическом симуляторе «тНавигатор». Для повышения качества проектирования ПАВ-полимерного заводнения отмечается необходимость воспроизведения фильтрационных исследований на керне и проведения масштабирования на размер ячейки, соответствующей размеру ячейки модели месторождения. В ходе масштабирования результатов моделирования фильтрационных исследований на крупную ячейку выявлена необходимость во введении дополнительного коэффициента для корректного переноса свойств с модели керна на модель месторождения и предложено решение.

3. В рамках проведенных расчетов на синтетических гидродинамических моделях получены зависимости эффективности технологии от геолого-физических параметров (критериев применимости ПАВ-полимерного заводнения). Полученные результаты и поведение зависимостей не противоречат исследованиям, описанным в литературе, а дополняют их в части применения к условиям терригенных коллекторов месторождений РТ.

4. В результате проведенных исследований влияния критериев применимости ПАВ-полимерного заводнения на эффективность технологии разработан комплексный геолого-физический параметр применимости технологии

ПАВ-полимерного заводнения. Наличие такого критерия позволяет выполнить экспресс-оценку применимости технологии на интересуемом объекте разработки.

5. В ходе вышеприведенных исследований разработан алгоритм выбора объектов разработки и участков для применения технологии ПАВ-полимерного заводнения. Обоснованы оптимальные варианты ПАВ-полимерного заводнения на месторождениях нефти Республики Татарстан с использованием трехмерного гидродинамического моделирования. Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертационной работы, могут быть использованы для повышения достоверности гидродинамических расчетов при применении технологии на месторождениях РТ.

6. В ходе вышеприведенных исследований разработаны: способ увеличения нефтеотдачи пласта (№2802645), программа для автоматизации алгоритма циклической закачки ПАВ-полимерной композиции в ПО «tNavigator» (№2022664978), программа по анализу нагнетательных скважин для МУН (№2021680263).

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

Печатные труды в рецензируемых научных изданиях и статьи в базе Scopus

1. Минихаиров, Л.И. Масштабирование результатов моделирования ПАВ-полимерного заводнения на керне при переходе на модель месторождения. / Л.И. Минихаиров, А.В. Насыбуллин // Нефтяная провинция. – 2023. - №2(34). - С. 130-136.

2. Обзор мировых проектов полимерных методов увеличения нефтеотдачи. / Р.Р. Ибатуллин, Ш.К. Гаффаров, М.Р. Хисаметдинов, Л.И. Минихаиров // Нефтяное хозяйство. – 2022. - №7. - С. 32-37.

3. Определение взаимовлияния скважин на основе комплекса методов ретроспективного анализа эксплуатации скважин и геохимических исследований. / М.С. Шипаева, Д.К. Нургалиев, В.А. Судаков, А.А. Шакиров, А.А. Лутфуллин, Л.И. Минихаиров // Нефтяное хозяйство. – 2022. - №1. - С. 64-69.

4. Minikhairov L.I. Specificities of surfactant-polymer flooding modeling and its role in the technology implementation at the Tatneft plays. / L. Minikhairov, A. Lutfullin, A. Gaifullin // IOR 2021: conference proceedings. – 2021. - P.1-12.

5. The geochemical survey methods for optimization of oil field development. / M.S. Shipaeva, D.K. Nurgaliev, V.A. Sudakov, A.A. Shakirov, A.A. Lutfullin, B.G. Ganiev, L.I. Minikhairov // International petroleum exhibition & conference: conference proceedings. – 2021. -SPE-207566-MS.

6. Specificity of reservoir simulation of heavy oil field accounting rock wettability. / A. Situdikova, L. Minikhairov, R. Khuzin, A. Miyassarov, D. Salikhov // International multidisciplinary scientific GeoConference: conference proceedings. – 2019. – Р. 1081-1088.

Патент и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. Патент №2802645 Российской Федерации, МПК E21B 43/22, E21B 43/26. Способ увеличения нефтеотдачи пласта: №2023103006: заявл. 10.02.2023: опубл. 30.08.2023 / Лутфуллин А.А., Минихаиров Л.И., Нафиков А.А.; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680263. Анализ нагнетательных скважин для МУН в КИС «АРМИТС»: №2021669266: заявл. 30.11.2021: опубл. 08.12.2021 / Яминова Г.Г., Курбанов А.Д., Минихаиров Л.И.; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022664978. Программа для автоматизации алгоритма циклической закачки ПАВ-полимерной композиции в ПО «tNavigator»: №2022663793: заявл. 25.07.2022: опубл. 08.08.2022 / Минихаиров Л.И., Курбанов А.Д.; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина.

Другие печатные труды

10. Минихаиров Л.И. Оценка применимости ПАВ-полимерного заводнения для залежей на поздней стадии разработки с учетом лабораторных работ и гидродинамического моделирования / Минихаиров Л.И. // «Геология и инновации. Проблемы и пути их решения»: Материалы конференции – Бугульма: Институт «ТатНИПИнефть». – 2022. – С.150-161.

11. Минихаиров Л.И. Опыт моделирования фильтрационных исследований на керне / Минихаиров Л.И. // VI Международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли»: Материалы конференции – Альметьевск: АГНИ. – 2021. – С.48-54.