

На правах рукописи

Бондаренко Алексей Александрович



**ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПАРОЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА ПРИ СКВАЖИННОЙ
ДОБЫЧЕ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ**

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

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

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Рогачев Михаил Константинович

Официальные оппоненты:

Прочухан Константин Юрьевич

доктор технических наук, акционерное общество «Кириллица» - Управляющая компания общества с ограниченной ответственностью «Оил Ресурс», заместитель генерального директора по технологическому развитию;

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 – государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск.

Защита диссертации состоится **15 июля 2026 года в 15:00** 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 1171**.

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

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



САВЕНОК
Ольга Вадимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Топливо-энергетический комплекс Российской Федерации оперативно реагирует на вызовы, связанные с необходимостью обеспечения энергетического суверенитета государства, активно вовлекая в разработку трудноизвлекаемые запасы нефти (ТРИЗ). Под ТРИЗ принято понимать запасы углеводородов, приуроченные к сложным геолого-физическим условиям, а также запасы сверхвязкой нефти. Сверхвязкая нефть (вязкость в пластовых условиях > 200 мПа·с), обладает, как правило, высокой плотностью ($> 0,895$ кг/см³ при 20 °С и 0,1 МПа). В отраслевой практике такую нефть обычно называют «тяжелой». При этом более 20% запасов нефти России представлены высоковязкими и сверхвязкими тяжелыми нефтями. Скважинная добыча такой нефти крайне затруднительна и требует применения специализированных тепловых методов. Пароциклические обработки (ПЦО) скважин являются одним из основных способов интенсификации скважинной добычи сверхвязких нефтей. Однако недостаточные размеры зон нефтяного пласта, охваченных воздействием паром, и увеличивающееся от цикла к циклу количество отложений высокомолекулярных компонентов нефти в эффективных поровых каналах способствуют снижению дебитов и рентабельных сроков эксплуатации скважин.

Существующие на сегодняшний день исследования сфокусированы преимущественно на одной конкретной задаче, при этом достижение максимальной эффективности ПЦО возможно только за счет комплексных технологических решений: воздействие на физико-химические процессы ПЦО с использованием вспомогательных химических композиций, расширение размеров паровых камер в продуктивном пласте посредством изменения геометрии добывающих скважин. Подбор основ вспомогательных химических композиций для повышения эффективности ПЦО, а также определение конструктивных особенностей добывающих скважин могут способствовать росту дебитов, снижению энергетических затрат, а также обеспечить стабильность скважинной добычи тяжелых нефтей.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами совершенствования технологий добычи высоковязких и сверхвязких нефтей, в том числе посредством тепловых методов, занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: Аметов И.М., Антониади Д.Г., Байбаков Н.К., Бакиров И.М, Боксерман А.А., Варфоломеев М.А., Вахин А.В., Вахитов Г.Г., Ганеева Ю.М., Гарушев А.Р., Гильманов А.Я., Гуськова И.А., Джалалов К.Э., Жданов С.А., Зарипов А.Т., Кондрашева Н.К., Кудинов В.И., Малофеев Г.Е., Морозюк О.А., Мухуматдинов И.И., Нургалиев Д.К., Прочухан К.Ю., Пудовкин М.А., Рогачев М.К., Рузин Л.М., Стрижнев К.В., Сургучев М.Л., Хабибулин З.А., Хафизов Р.И., Чекалюк Э.Б., Шайхутдинов Д.К., Батлер Р., Бурже Ж., Жао Л., Ловерье Х., Фарух А.М. и др.

Несмотря на большое количество исследований в отношении тепловых методов воздействия на продуктивный нефтяной пласт и его призабойную зону при скважинной добыче нефти, вопросы, связанные с отложениями высокомолекулярных нефтяных компонентов в результате контакта нефти и высокотемпературного агента, а также необходимостью увеличения зоны теплового воздействия, остаются малоизученными.

Объект исследования – призабойная зона пласта (ПЗП) со сверхвязкой нефтью и карбонатным типом коллектора при пароциклической обработке добывающих скважин.

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

Цель работы – повышение эффективности пароциклических обработок скважин при добыче сверхвязкой нефти.

Идея работы. Поставленная цель достигается за счет применения комплексной технологии пароциклического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта, включающей комбинированную закачку в ПЗП пара и каталитической химической композиции для внутрипластового акватермолиза нефти, осуществляемую через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протя-

женности, что позволяет увеличить размеры зоны эффективного теплового воздействия, снизить плотность органических отложений в ПЗП, увеличить дебит и рентабельный срок эксплуатации скважин.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих проблем при разработке месторождений тяжелых нефтей тепловыми методами, методов борьбы с возникающими осложнениями.

2. Сформировать экспериментальную матрицу, отражающую актуальные и наиболее показательные результаты исследований процессов каталитического акватермолиза, установить наиболее каталитически активные переходные металлы и доноры водорода.

3. Выполнить анализ существующих подходов по повышению эффективности пароциклических обработок ПЗП посредством строительства многозабойных скважин.

4. Разработать комплексную программу лабораторных исследований процессов каталитического и некаталитического обогащения рассматриваемой в работе тяжелой сверхвязкой нефти.

5. Установить наиболее каталитически активный переходный металл для процесса каталитического обогащения исследуемой тяжелой сверхвязкой нефти.

6. Посредством численного моделирования установить наиболее эффективную геометрию многозабойной добывающей скважины при проведении пароциклических обработок на объекте исследования.

7. Посредством численного моделирования выполнить оценку эффекта комплексной технологии пароциклического воздействия на ПЗП, предусматривающей закачку прекурсора катализатора акватермолиза через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протяженности.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально установлено, что переходный металл Мо является наиболее каталитически активным металлом в сравнении с Ni, Fe и Cu в процессе акватермолиза тяжелой сверхвязкой

нефти при добавлении его в составе водорастворимого аммония молибденовокислого $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в концентрации 5% масс. по нефти, водонефтяном соотношении 0,3, температуре реакции 250 °С и давлении 7 МПа.

2. На основе численного моделирования пароциклической обработки добывающих скважин установлено, что многозабойная горизонтальная скважина по типу «fishbone» в сравнении с горизонтальной скважиной и различными конфигурациями вертикальных многозабойных скважин обеспечивает относительно вертикальной скважины максимальный эффект по накопленной добыче нефти более 30%, а дополнительная закачка в ПЗП совместно с паром аммония молибденовокислого $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в качестве прекурсора катализатора акватермолиза тяжелой нефти позволяет снизить плотность органических отложений в этой зоне пласта на 50% и повысить эффект по накопленной добыче более чем на 20%.

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 подбору наиболее каталитически активных переходных металлов для прекурсоров катализаторов внутрискважинного акватермолиза тяжелой сверхвязкой нефти при пароциклических обработках добывающих скважин, с учетом установленных зависимостей реологических свойств нефти от различных условий реакций каталитического акватермолиза, что вносит определенный вклад в теорию и практику разработки нефтяных месторождений.

2. Установленная экспериментальным путем каталитическая активность переходного металла Мо в реакциях акватермолиза тяжелой сверхвязкой нефти показала перспективность применения прекурсоров катализаторов акватермолиза на его основе для повышения эффективности пароциклических обработок добывающих скважин за счет снижения вязкости нефти и содержания в ней асфальтенов, что обеспечивает повышение рентабельного срока эксплуатации скважин.

3. Путем численного моделирования пароциклической обработки добывающих скважин показана эффективность применения многозбойных горизонтальных скважин по типу «fishbone» при разработке залежей тяжелых сверхвязких нефтей с пароциклическим воздействием на ПЗП для увеличения зоны эффективного теплового воздействия и, как следствие, повышения накопленной добычи нефти.

4. Обоснованная комплексная технология была зарегистрирована в качестве способа разработки залежи сверхвязкой нефти пароциклическим воздействием (патент РФ на изобретение №2839154), который может быть использован при проектировании дизайна пароциклической обработки скважин на месторождениях тяжелой нефти.

5. Материалы и результаты работы были использованы в производственной деятельности компании АНО «Институт нефтегазовых технологических инициатив» при формировании потенциальных нормативно-технических документов, при планировании сопровождения лабораторных и опытно-промышленных испытаний (акт внедрения от 07.04.2026 г.).

Методология и методы исследования

В рамках настоящей диссертационной работы использовались методы анализа и синтеза для обработки больших объемов данных сформированной экспериментальной матрицы, физические и численные методы исследования с применением сертифицированного и поверенного лабораторного оборудования, а также современных программных продуктов для геолого-гидродинамического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленная экспериментальным путем каталитическая активность переходного металла Мо в реакциях акватермолиза тяжелой сверхвязкой нефти позволяет рекомендовать его в качестве основы каталитических композиций, закачиваемых в призабойную зону продуктивного пласта для повышения эффективности пароциклических обработок добывающих скважин за счет внутрипластового облагораживания нефти (снижения вязкости и содержания асфальтенов).

2. Использование комплексной технологии пароциклического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта при разработке залежей тяжелой сверхвязкой нефти, включающей комбинированную закачку в ПЗП пара и каталитической химической композиции на основе Мо для внутрипластового акватермолиза нефти, осуществляемую через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протяженности, позволяет увеличить размеры зоны эффективного теплового воздействия, снизить плотность органических отложений в ПЗП, увеличить дебит и рентабельный срок эксплуатации добывающих скважин.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена теоретическими исследованиями, физическим моделированием с использованием современного лабораторного оборудования

компаний Vinci Technologies, Rheotest, «Геологика» и др., повторяемостью полученных результатов.

Апробация результатов проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние три года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Инжиниринг строительства и реконструкции скважин» (г. Самара, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Практические аспекты нефтепромышленной химии» (г. Уфа, 2024 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Ашировские чтения 2024» (г. Самара, 2024 г.); Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы нефти – 2025» (г. Альметьевск, 2025 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Ашировские чтения 2025», (г. Самара, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе ранее опубликованных материалов по теме диссертации, постановке задач исследования, проведении лабораторных экспериментов, проведении численного моделирования, обработке и интерпретации результатов исследования, подготовке текста диссертации, формулировании выводов и основных защищаемых положений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 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 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 208 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков и 20 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, сотрудникам центра компетенций в области техники и технологий освоения месторождений в Арктических условиях за оказанную помощь и содействие в написании диссертационной работы, а также представителям Отдела исследований тепловых и газовых методов воздействия на пласт ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (г. Пермь).

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 представлен анализ существующих осложнений при проведении пароциклических обработок (ПЦО) добывающих скважин, методов борьбы с ними. Установлено, что органические отложения являются одной из ключевых и малоизученных проблем при проведении ПЦО, а каталитические химические системы являются наиболее эффективным методом борьбы с ними. На основе сформированной экспериментальной матрицы определены переходные металлы и доноры водорода, способствующие достижению максимальной степени облагораживания нефти в процессе ПЦО. Проанализирован существующий опыт исследований многозабойных скважин, как дополнительного способа повышения эффективности ПЦО.

Во второй главе описана программа комплексных лабораторных исследований реологических свойств и группового состава тяжелой нефти, в том числе после физического моделирования реакций некаталитического и каталитического акватермолиза с целью установления наиболее каталитически активного переходного металла как основы прекурсоров для повышения эффективности внутрислоевого облагораживания нефти.

В третьей главе представлены результаты физического моделирования внутрислоевого облагораживания тяжелой нефти в присутствии водорастворимых солей Mo, Ni, Fe, Cu. На основании изменения вязкости и группового состава нефти установлен наиболее

каталитически активный переходный металл, который может быть использован в качестве основы для прекурсоров катализаторов внутрипластового акватермолиза тяжелой нефти.

В четвертой главе посредством численного моделирования осуществлен подбор наиболее эффективной геометрии многозабойной скважины для разработки залежи тяжелой нефти пароциклическим воздействием, произведена оценка эффективности комплексной технологии пароциклического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта, предусматривающей комбинированную закачку в ПЗП пара и прекурсора катализатора акватермолиза через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протяженности.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Установленная экспериментальным путем каталитическая активность переходного металла Мо в реакциях акватермолиза тяжелой сверхвязкой нефти позволяет рекомендовать его в качестве основы каталитических композиций, закачиваемых в призабойную зону продуктивного пласта для повышения эффективности пароциклических обработок добывающих скважин за счет внутрипластового облагораживания нефти (снижения вязкости и содержания асфальтенов).

В соответствии с классификацией, принятой в России в 2016 году, нефть объекта диссертационного исследования с вязкостью ~2000 мПа·с (в пластовых условиях) и плотностью 962 кг/м³, совокупным содержанием смол и асфальтенов более 15% относится к сверхвязкой, битуминозной и высокосмолистой. Вязкостно-температурные характеристики исследуемой нефти после некаталитического и каталитического акватермолиза с использованием водорастворимых солей $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в качестве прекурсоров представлены на рисунке 1. Использование аммония молибденовокислого способствовало максимальному снижению вязкости 38% относительно некаталитического

воздействия. Таким образом, для исследуемой нефти был уточнен порядок переходных металлов с точки зрения их каталитической активности при внутрипластовом облагораживании:



Добавление прекурсора на основе Mo в концентрации 5% масс. по нефти обеспечивает при температуре 20 °С максимальное снижение вязкости нефти 38%, но практически сопоставимое относительно использования прекурсора в концентрации 3% масс. по нефти – 37% (рисунок 2). Стоит отметить, что аммоний молибденовокислый, добавленный в реакционную смесь в концентрациях 0,5% и 1% масс. по нефти практически не способствует снижению вязкости нефти, что объясняется недостаточным количеством молекул переходных металлов для катализа реакции аквагермолиза. Важно отметить, что повышение концентрации прекурсора всего на 2% масс. по нефти увеличивает эффект более чем на 35%. Такой скачок вязкости предположительно связан с достижением пороговой концентрации катализатора в реакционной смеси, что привело к дестабилизации отдельных молекулярных компонентов, а всей системы в целом. С другой стороны, прекурсор в концентрации 7% масс. по нефти оказывает отрицательный эффект на вязкость нефти, увеличивая ее на 6%. Такой результат связан с превышением эффективной массовой концентрации переходного металла в реакционной смеси, в результате агрегирования частиц металла с образованием крупных комплексов с асфальтенами становится более интенсивным процессом относительно каталитического облагораживания нефти.

Влияние водонефтяного соотношения на вязкостно-температурную характеристику нефти после каталитического аквагермолиза в присутствии Mo представлен на рисунке 3. Снижение вязкости составляет 38%, 33% и 30% для водонефтяных соотношений 0,3, 0,2 и 0,15 соответственно. Таким образом, включение в реакционную смесь аммония молибденовокислого обеспечивает возможность использования теплоносителя в меньшем объеме.

На основании полученных результатов (рисунок 4) можно сделать вывод, что образуемый непосредственно в пласте в процессе облагораживания исследуемой нефти катализатор на основе молибдена позволяет расширить нижнюю температурную границу реакций

акватермолиза. Так, при температурах выдержки в автоклаве 200 °С и 180 °С было достигнуто снижение вязкости нефти 24% и 23% соответственно относительно некаталитического воздействия. После выдержки при температуре 150 °С вязкостная кривая практически сопоставима с кривой после некаталитического акватермолиза, при этом при температуре 20 °С снижение вязкости нефти находится в пределах погрешности вискозиметра и составляет не более 2%.

Таким образом, указанные параметры для исследуемой нефти и наиболее эффективного прекурсора могут быть упорядочены следующим образом по степени влияния на вязкостную характеристику: концентрация прекурсора > температура реакции > водонефтяное соотношение.

При некаталитическом акватермолизе наблюдается увеличение содержания асфальтенов на 20%, что подтверждает высокую вероятность коагуляции призабойной зоны пласта при проведении большого числа циклов ПЦО (рисунок 5). При этом, если проводить параллель с вязкостными характеристиками, можно говорить о том, что вязкость исследуемой нефти наиболее чувствительна к изменению количества смол в нефти. В сравнении с некаталитическим воздействием в случае применения прекурсора на основе молибдена отмечается увеличение содержания насыщенных и ароматических компонентов на 6% и 5% соответственно, при этом содержание смол остается практически на том же уровне, увеличиваясь не более чем на 1%, а количество асфальтенов уменьшается на 30%. Такое существенное снижение асфальтенов является дополнительным стимулом для сдвига вязкостной кривой вниз в результате более активного разрушения связей C-S. Включение в реакционную смесь аммония молибденовокислого способствовало снижению содержания парафинов на 22% (рисунок 6). Такой эффект предположительно связан с изменением формы кристаллов парафина, снижением их агрегации, увеличением степени их дисперсности и, следовательно, преобразованием их в более легкие фракции.

2. Использование комплексной технологии пароциклического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта при разработке залежей тяжелой сверхвязкой нефти, включаю-

щей комбинированную закачку в ПЗП пара и каталитической химической композиции на основе Мо для внутрислоевого акватермолиза нефти, осуществляемую через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протяженности, позволяет увеличить размеры зоны эффективного теплового воздействия, снизить плотность органических отложений в ПЗП, увеличить дебит и рентабельный срок эксплуатации добывающих скважин.

В рамках исследования рассматривались профили добывающих скважин, представленные на рисунке 7. Накопленная добыча нефти для каждого из семи моделируемых сценариев одного цикла ПЦО представлена на рисунке 8. Под «fishbone» в настоящей работе подразумевается геометрия скважины, представленная материнским горизонтальным стволом с боковыми ответвлениями (стволами) в виде перфорационных каналов диаметром 50–70 мм и заданной длины. Строительство таких каналов сверхмалого диаметра осуществляется посредством механического радиального бурения, что обеспечивает адресность воздействия, и является более дешевым решением относительно классической многозабойной скважины. Время закачки пара, пропитки и добычи выбиралось как усредненное в соответствии с опытом работ на схожих объектах. Основной акцент в модели делался на изменении дебита и накопленной добычи, а не на подборе дизайна ПЦО. Вариант заканчивания «fishbone» позволяет достичь самого высокого увеличения накопленной добычи нефти относительно случая с вертикальной скважиной (таблица 1).

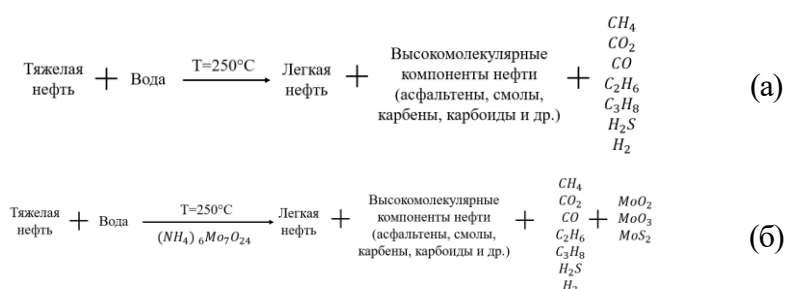
Таблица 1 – Сравнение накопленной добычи нефти для моделируемых сценариев

Профиль скважины	BC	2O	1OЦ	2O13	1O13	ГС	fish-bone
Эффект относительно BC, %	-	12	20	23	28	23	34

Каждый из моделируемых вариантов геометрий скважин продемонстрировал различные размеры паровых камер в диапазоне температур реакций акватермолиза (рисунок 9). Очевидно, что скважинные ответвления позволяют формировать зоны реакций

акватермолиза в удаленных участках объекта, что стимулирует большую выработку запасов. При этом наибольший размер паровых камер для пяти сценариев многозабойного заканчивания идентифицируется для случая «fishbone», что обуславливает полученный технологический эффект. Диагональные ответвления от основного горизонтального ствола («fishbone») способствуют повышению эффективности применения горизонтальной скважины на 8%. Окончательный выбор геометрии скважины будет зависеть от экономической целесообразности увеличения этапов строительства по отношению к получаемому технологическому эффекту.

С целью оценки характера распределения высокомолекулярных компонентов нефти в околоскважинном пространстве после проведения ПЦО численная модель была дополнена реакционной взаимосвязью компонентов (химических веществ), вовлеченных в процесс внутрислоевого облагораживания посредством определения реакций (рисунок 10).



а – некаталитический акватермолиз;

б – каталитический акватермолиз

Рисунок 10 – Условные схемы реакций акватермолиза, использованные в модели

Представленные реакции не отражают полной картины взаимодействия нефти, горной породы, пара и закачиваемых реагентов, но являются достаточными для оценки распределения высокомолекулярных компонентов нефти в призабойной зоне пласта. Количество ячеек было сокращено с целью ускорения расчетов модели. Результаты моделирования для каждой из ранее рассмотренных геометрий

скважин представлены на рисунке 11. На основании полученных результатов можно утверждать, что даже один цикл ПЦО способствует значительным отложениям высокомолекулярных компонентов нефти в околоскважинном пространстве. Меньшему негативному воздействию подвергается скважина с геометрией «fishbone» (ж). Такой эффект, предположительно, связан с тем, что пар, закачиваемый в одном и том же объеме для каждого из сценариев, в случаях с более разветвленной геометрией концентрирует свою активность в более удаленных участках в относительно меньших объемах. Поэтому максимальные значения молярных плотностей отложений отмечаются в крайних точках ответвлений.

В случае с каталитическим акватермолизом стоит отметить более равномерное распределение органических отложений в материнском стволе и в ответвлениях с одновременным снижением плотности порядка 50% относительно некаталитического воздействия даже через три цикла ПЦО (рисунок 12). Сравнение дебитов скважин после некаталитического и каталитического ПЦО представлено на рисунке 13. Увеличение дебита скважины от цикла к циклу за счет включения каталитической композиции в пар увеличивается на 16%, 38% и более 300%. Особенно значимые изменения отмечаются для последнего цикла ПЦО. Такой эффект предположительно достигается за счет снижения вязкости нефти и степени коагуляции ПЗП. Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод, что предлагаемая комплексная технология обеспечивает поддержание рентабельного дебита скважины на протяжении 3-циклов, условно принимая рентабельную границу в 20 м³/сут.

Увеличение накопленной добычи нефти по результатам трех циклов ПЦО составило 22%, что в условиях роста цен на нефть может стать достаточным эффектом для перекрытия затрат на строительство многозайбойной скважины и закупку вспомогательных химических реагентов (рисунок 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования решена научно-практическая задача, направленная на повышение эффективности пароциклических обработок скважин при добыче сверхвязкой нефти

посредством комбинированной закачки в призабойную зону продуктивного пласта пара и прекурсоров катализаторов акватермолиза на основе молибдена – для внутрипластового облагораживания нефти, осуществляемой через специально пробуренные из материнского ствола добывающей скважины перфорационные каналы выбранной геометрии и протяженности – для увеличения зоны охвата околоскважинного пространства тепловым воздействием.

По результатам диссертационного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ позволил установить, что наряду с другими возможными осложнениями при реализации ПЦО высокомолекулярные органические отложения являются ключевой и малоизученной проблемой, применение каталитических химических систем в процессе ПЦО отмечено как наиболее эффективный способ борьбы с такими отложениями.

2. На основе сформированной экспериментальной матрицы установлены переходные металлы и доноры водорода, способствующие достижению максимальной степени облагораживания нефти в рамках реакций акватермолиза.

3. Среди существующих технологий повышения эффективности ПЦО наряду с дополнительной закачкой химических композиций строительство многозабойных скважин является малоизученным и перспективным решением.

4. На основании проведенных лабораторных исследований в соответствии с сформированной программой экспериментов установлено, что максимальная степень облагораживания исследуемой нефти в процессе акватермолиза достигается за счет применения аммония молибденовокислого $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в сравнении с $\text{NiSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Полученный эффект находит свое подтверждение в значительном снижении содержания асфальтенов в каталитически облагороженной нефти.

5. По результатам лабораторных исследований установлены зависимости вязкости исследуемой тяжелой сверхвязкой нефти от температуры после каталитического акватермолиза в присутствии $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ для различных концентраций прекурсора, водо-нефтяных соотношений, температур и времени проведения реакции,

для случая включения в реакционную смесь донора водорода. На основании полученных зависимостей определены наиболее эффективные условия применения $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ для каталитического облагораживания тяжелых сверхвязких нефтей со схожими с исследуемой нефтью составом и свойствами.

6. На основании численного моделирования пароциклической обработки нефтяных скважин горизонтальная добывающая скважина с перфорационными каналами выбранной геометрии и протяженности была определена как наиболее эффективная в части обеспечения накопленной добычи нефти в сравнении с горизонтальной добывающей скважиной и различными конфигурациями многозабойных вертикальных скважин. В совокупности с применением $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в качестве прекурсора катализатора был достигнут максимальный технологический эффект в соответствии с условиями настоящей работы. С учетом описания технологических особенностей реализации предложенной технологии был обоснован и запатентован «Способ разработки залежи сверхвязкой нефти пароциклическим воздействием» (патент РФ № 2839154).

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с разработкой различных видов прекурсоров катализаторов на основе молибдена, совершенствованием подходов проведения фильтрационных экспериментов, созданием новых комплексных решений для повышения эффективности ПЦО на уровне физико-химических процессов, а также технических средств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Бондаренко, А.А.** Глубоко проникающая пароциклическая обработка призабойной зоны карбонатных коллекторов со сверхвязкой нефтью как метод стимуляции скважин / А.А. Бондаренко, И.А. Лягов, М.К. Рогачев, А.Н. Александров // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 5(270). – С. 60-65.

2. **Бондаренко, А. А.** Подбор эффективной геометрии скважины для проведения пароциклической обработки / А. А. Бондаренко, М. К. Рогачев // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2025. – № 8. – С. 71–74.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. **Bondarenko, A. A.** Catalytic Conversion of Heavy Oil Using Molybdenum Based Water-Soluble Catalyst / A. A. Bondarenko, M. K. Rogachev, A. S. Skvortsov, K. V. Dmitriev // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2026. – Vol. 39, № 8. – P. 1821–1828. – DOI: 10.5829/ije.2026.39.08b.04.

4. **Bondarenko, A. A.** Increasing Efficiency of Solvent Assisted Cyclic Steam Stimulation of the Bottomhole Formation Zone of a Carbonate Reservoir Using Aquathermolysis Catalysts / A. A. Bondarenko, M. K. Rogachev, A. R. Sharifov, D. V. Mardashov // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2025. – Vol. 38, № 4. – P. 758–766. – DOI: 10.5829/ije.2025.38.04a.08.

Патент:

5. Патент № 2839154 Российская Федерация, МПК C09K 8/592 (2006.01); СПК C09K 8/592 (2024.08). Способ разработки залежи сверхвязкой нефти пароциклическим воздействием. Заявка № 2024120476: заявл. 19.07.2024; опубл. 28.04.2025 / **А.А. Бондаренко**, М.К. Рогачев, А.Н. Александров; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 19 с.

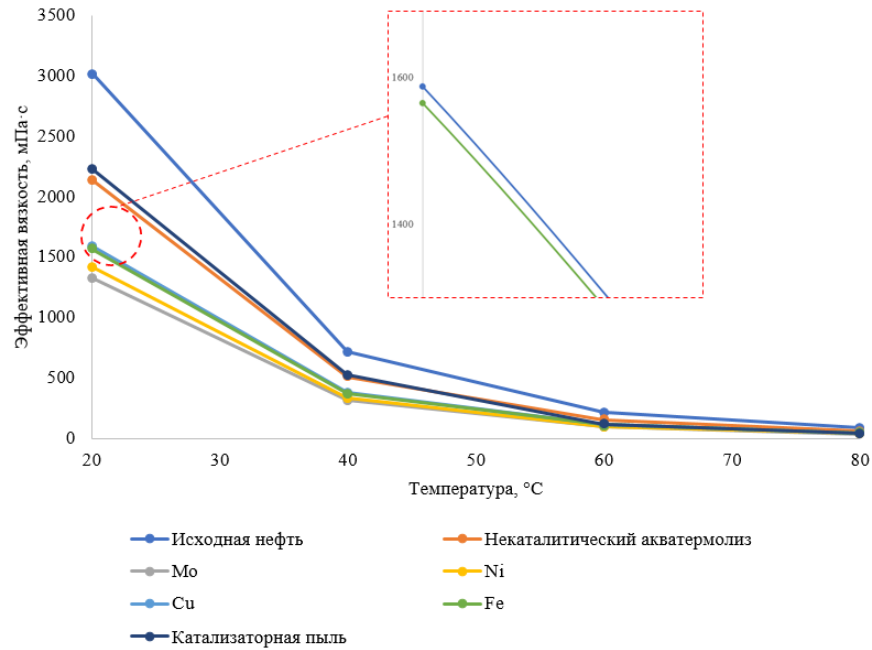


Рисунок 1 – Вязкостно-температурные характеристики тяжелой нефти после каталитического акватермолиза

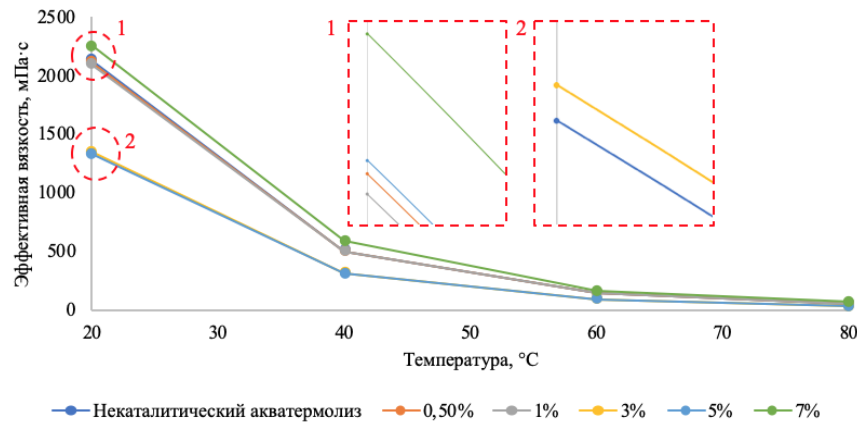


Рисунок 2 – Вязкостно-температурные характеристики тяжелой нефти после каталитического акватермолиза с прекурсором на основе Mo в различных концентрациях

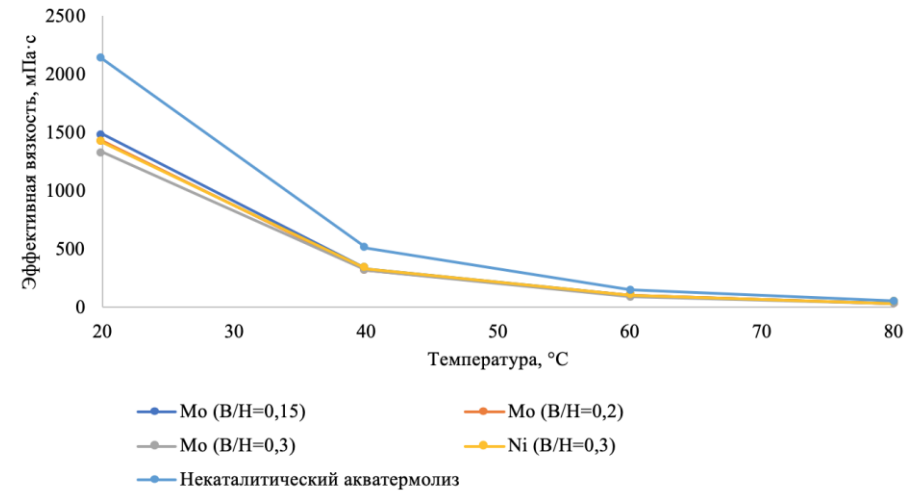


Рисунок 3 – Вязкостно-температурные характеристики тяжелой нефти после каталитического акватермолиза при различных соотношениях воды к нефти

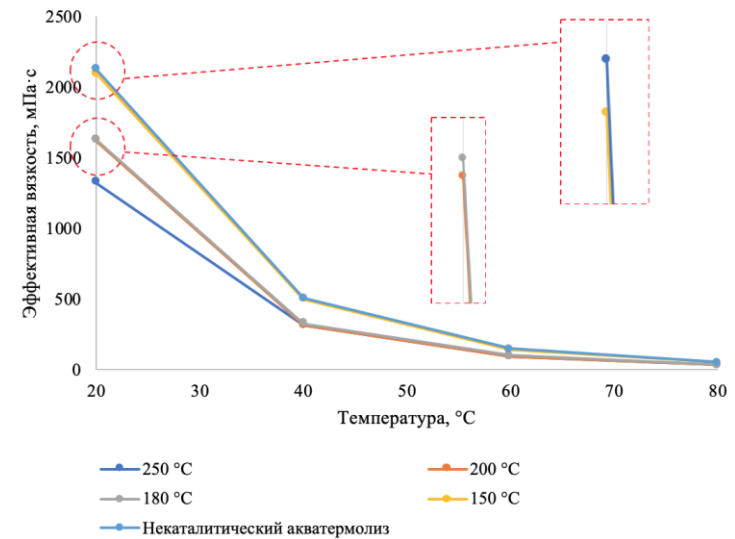


Рисунок 4 – Вязкостно-температурные характеристики тяжелой нефти после каталитического акватермолиза при более низких температурах выдержки

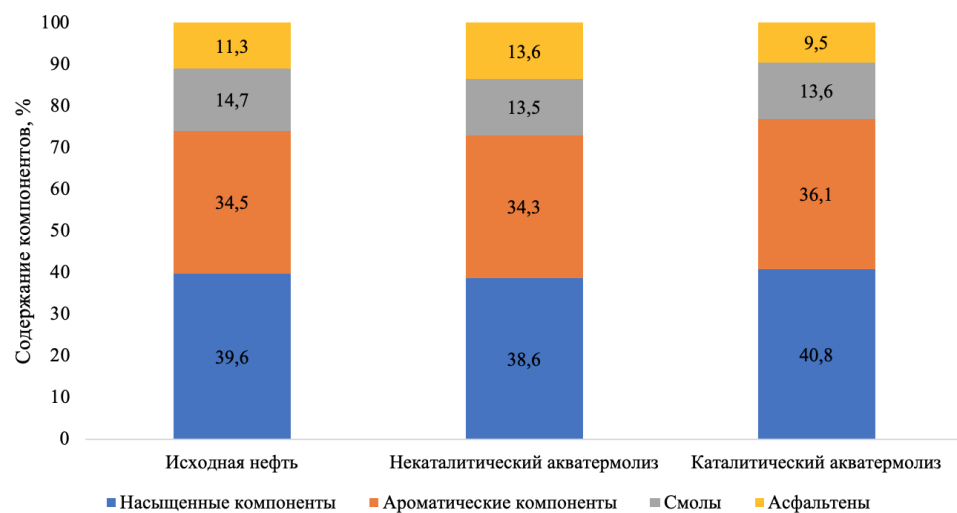


Рисунок 5 – Результаты определения группового состава нефти

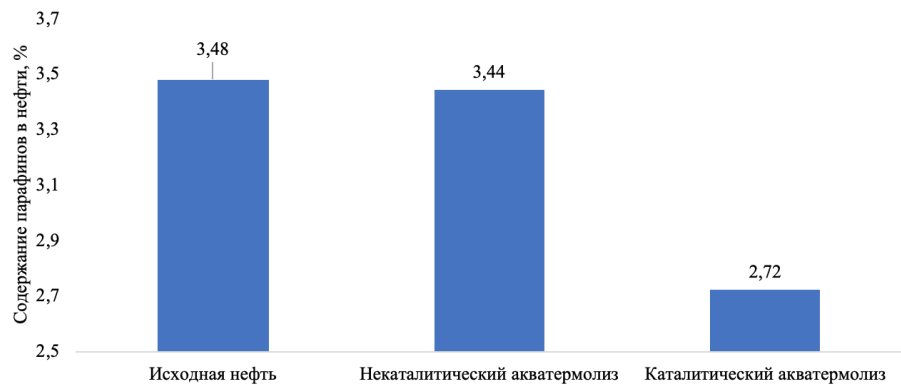
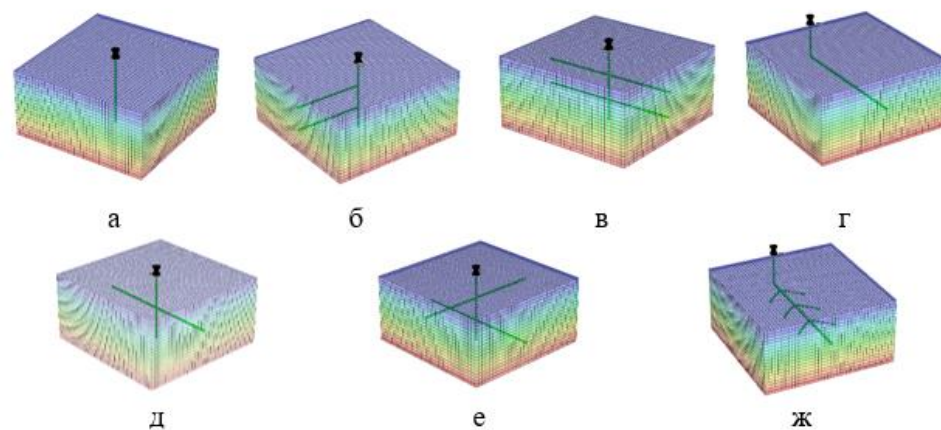


Рисунок 6 – Содержание парафинов в образцах исходной и облагороженной нефти



а – вертикальная скважина (BC); б – два ответвления с одной стороны в верхней и нижней трети объекта (2O); в – два ответвления с каждой стороны в верхней и нижней трети объекта (2O13); г – горизонтальная скважина (ГС); д – одно ответвление с каждой стороны в центральной части объекта (1OЦ); е – одно ответвление с каждой стороны в верхней и нижней трети объекта (1O13); ж – многозбойная горизонтальная скважина (fishbone)

Рисунок 7 – Варианты геометрий скважин в модели (цветовая заливка определяет индекс слоя)

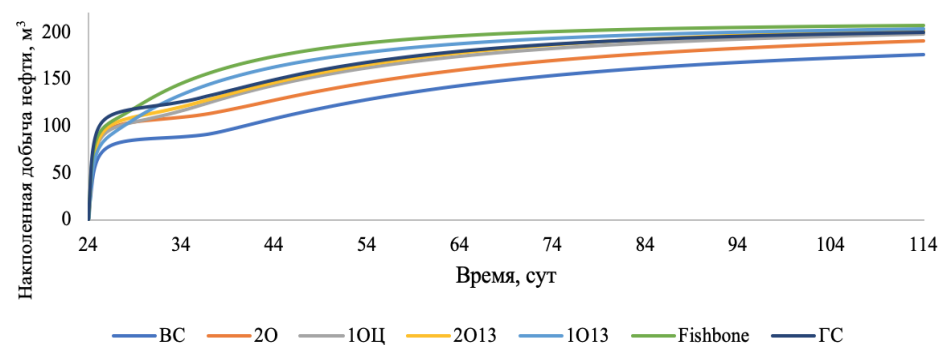
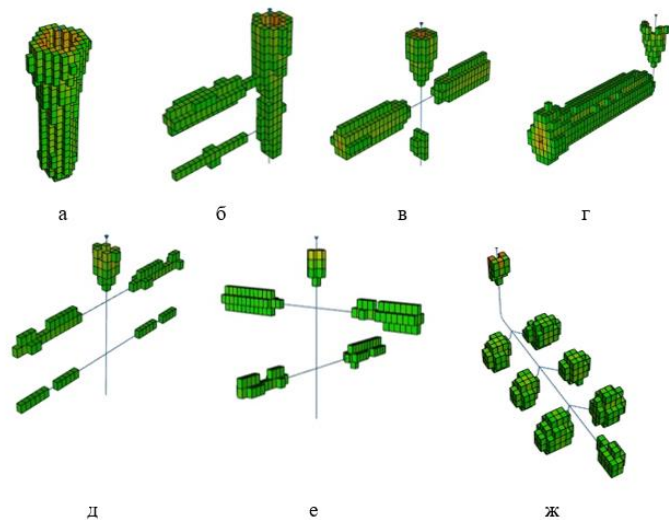
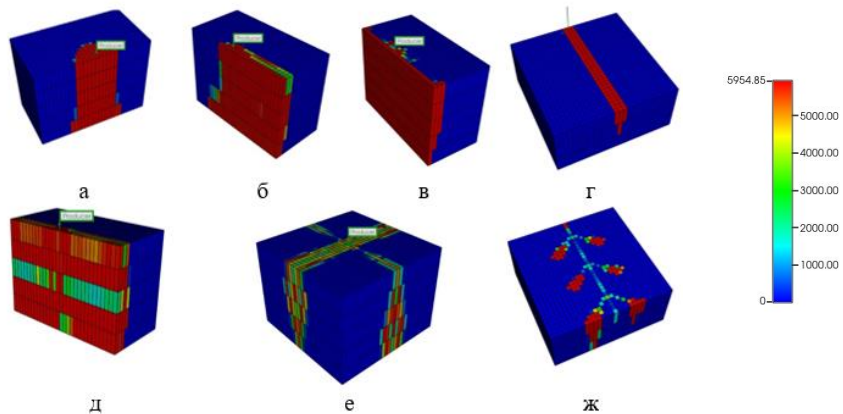


Рисунок 8 – Накопленная добыча нефти для моделируемых сценариев



а – BC; б – 2O; в – 1OЦ; г – ГС; д – 2O13; е – 1O13; ж - fishbone

Рисунок 9 – Паровые камеры в температурном диапазоне реакций акватермолита для смоделированных сценариев (изменение цвета от зеленого к красному соответствует изменению температуры от минимальной до максимальной)



а – BC; б – 2O; в – 1OЦ; г – ГС; д – 2O13; е – 1O13; ж - Fishbone

Рисунок 11 – Характер распределения высокомолекулярных компонентов нефти в околоскважинном пространстве после одного цикла ПЦО (значения на шкале в моль/м³)

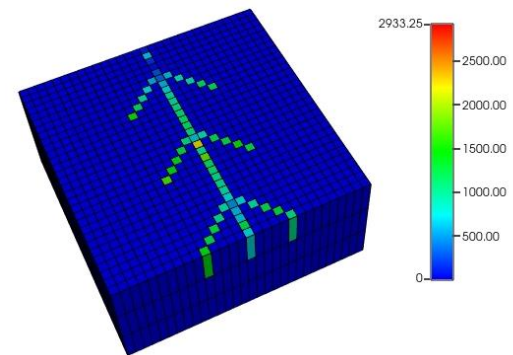


Рисунок 12 – Характер распределения высокомолекулярных компонентов нефти в околоскважинном пространстве после трех циклов ПЦО с прекурсором на основе Мо (значения на шкале в моль/м³)

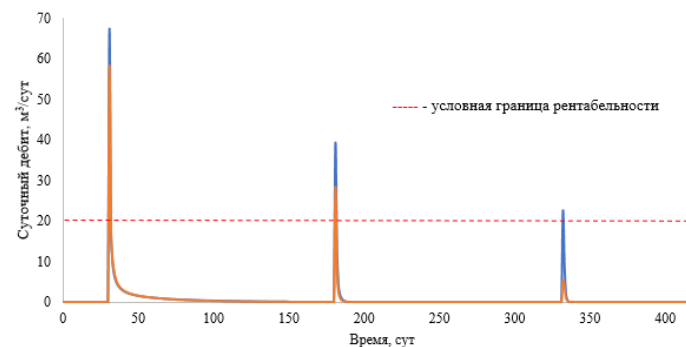


Рисунок 13 – Суточный дебит скважин после некаталитического и каталитического ПЦО

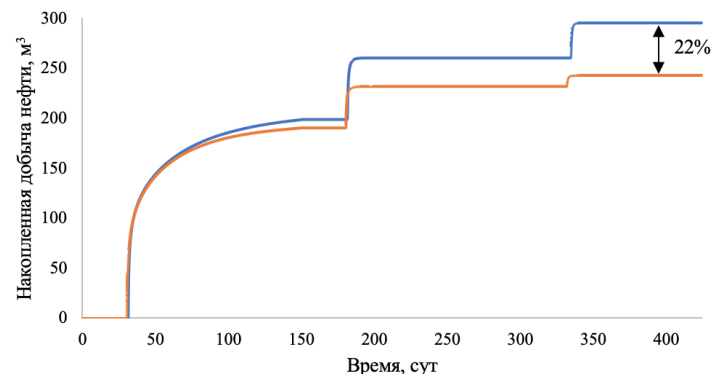


Рисунок 14 – Сравнение накопленной добычи нефти после некаталитического и каталитического ПЦО