

На правах рукописи

Сытник Юлия Андреевна



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРО- И
ВОДОИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ НА
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВЫСОКОВЯЗКОЙ И
СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ**

*Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтя-
ных 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

Раупов Инзир Рамилевич

Официальные оппоненты:

Фаттахов Ирик Галиханович

доктор технических наук, доцент, Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти (ТатНИПИнефть) публичного акционерного общества «Татнефть» им. В.Д. Шашина, директор по повышению нефтеотдачи пластов, волновым и биотехнологиям;

Якубов Равиль Наилевич

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

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **5 декабря 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.13 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета 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

На сегодняшний день доля добычи трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ) превышает долю нефти из традиционных коллекторов. Под ТРИЗ нефти принято понимать запасы месторождений, которые отличаются неблагоприятными для извлечения геологическими условиями залегания и физическими свойствами нефти. Значительная доля запасов (3,3 млрд т, что составляет 22 %) нефти России приходится на высоковязкую (ВВН) и сверхвязкую нефть (СВН). При этом в структуре добычи ТРИЗ доля ВВН и СВН не превышает 3 %.

Наиболее применяемыми методами в отношении добычи ВВН и СВН являются тепловые. Тепловые методы увеличения нефтеотдачи (МУН) представляют собой нагнетание теплоносителей в пласт, в частности, горячей воды или пара, применение которых направлено на повышение подвижности нефти. При разработке месторождений ВВН и СВН с помощью нагнетания водяного пара экономическую и технологическую эффективность применяемых технологий можно оценить через паронефтяное отношение (ПНО). Благоприятным ПНО считается 3, однако на российских месторождениях этот показатель составляет >10 . Частным случаем разработки ВВН и СВН путем нагнетания пара является его прорывы по высокопроницаемым каналам к забоям добывающих скважин (ДС). Конденсируясь, пар превращается в воду, что приводит к нежелательной добыче воды. Нагнетание горячей воды в пласт приводит к дополнительной добыче попутно-добываемой воды, которая значительно снижает рентабельность работы эксплуатационных скважин. Среднее значение водонефтяного фактора для месторождений ВВН и СВН составляет 30.

С целью снижения количества попутно-добываемой воды на месторождениях ВВН и СВН внедряют паро- и водоизоляционные работы. Наиболее широко применяются на сегодняшний день для решения проблем преждевременного обводнения скважин технологии, основанные на закачке в пласт или в призабойную зону пласта растворов на основе синтетических полимеров, в частности, полиакриламида (ПАА) или его гидролизированных форм (ГПАА) в составе со

сшивателями. При тепловом воздействии акрилаимидные группы подвергаются гидролизу с образованием акрилатных групп. Кроме того, при наличии солей жесткости (особенно Ca^{2+}) в пластовой воде и высокой доли акрилатных групп ГПАА выпадает в осадок с дальнейшей потерей вязкости полимерного раствора. При больших скоростях потока линейные структуры деформируются и в дальнейшем разрушаются.

В этой связи создание новых комбинированных методов воздействия на залежи ВВН и СВН, основанных на синергетическом эффекте теплового и физико-химического воздействия, является актуальной научной и практической задачей.

Степень разработанности темы исследования

Развитие технологий добычи ВВН и СВН в России связано с научными трудами коллективов авторов под руководством Алтунинской Л.К., Антониади Д.Г., Газизова А.А., Газизова, А.Ш., Галкина С.В., Золотухина А.Б., Зарипова А.Т., Ибатуллина Р.Р., Кондрашевой Н.К., Крейга Ф.Ф., Кувшинова В.А., Ленченковой Л.Е., Морозюк О.А., Насыбуллина А.В., Рогачева М.К., Рузина Л.М., Стрижнева К.В., Стрижнева В.А., Сургучева М.Л., Телина А.Г., Хайретдинова Н.Ш., Хисаметдинова М.Р., Хисамутдинова Н.И., Фатахова И.Г., Фахретдинова Р.Н., Чекалюк Э.Б. и др. В международном научном сообществе не менее значимыми являются результаты лабораторных и полевых исследований Farouq Ali S.M., Batler R., Bai B., Shah A., Kovscek A., Salunkhe B., Lake L., Seright R., Delamaide E., Zhang G., Thomas A., и др.

Однако в работах авторов уделено недостаточно внимания разработке температуростойких систем для паро- и водоизоляционных работ в скважинах на месторождениях ВВН и СВН.

Объект исследования – неоднородные терригенные коллекторы, содержащие высоковязкую и сверхвязкую нефть, разрабатываемые вытеснением горячей водой и водяным паром.

Предмет исследования – физико-химические процессы в объекте исследования.

Цель работы – повышение степени извлечения высоковязкой и сверхвязкой нефти на месторождениях с неоднородными терригенными коллекторами, разрабатываемых тепловыми методами.

Идея работы. Поставленная цель достигается за счет регулирования фильтрационных потоков путем создания блокирующего экрана термостойкими полимерными составами.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проанализировать и выявить особенности разработки месторождений ВВН и СВН, существующих методов и технологий их добычи. Определить основные механизмы обводнения продукции добывающих скважин.

2. Исследовать современные технологии паро- и водоизоляционных работ при разработке месторождений ВВН и СВН.

3. Провести лабораторные исследования по изучению процесса вытеснения ВВН и СВН на моделях продуктивных пластов. Оценить вытесняющую способность с помощью тепловых агентов.

4. Разработать полимерные составы, позволяющие регулировать фильтрационные характеристики в неоднородном терригенном пласте, способные сохранять свои реологические и физико-химические свойства в условиях закачки горячей воды до 120 °С и в условиях воздействия паром при температуре до 250 °С.

5. Оценить технологическую эффективность применения разработанных составов на моделях объекта исследования.

Научная новизна исследования

1. Установлено повышение термостабильности 1...3 % - ных водных растворов полиакриламида и 3...10% - ных водных растворов поливинилового спирта (в диапазоне температур 120 °С...250 °С) при добавлении к ним 1...10 % масс. хромсодержащих реагентов - ацетата хрома III или катализаторного шлама сектора переработки минерального сырья.

2. Выявлена способность разработанного полимерного состава, представляющего собой смесь водного раствора полимера акрилового ряда и катализаторного шлама, создавать блокирующий экран в поровом пространстве объекта исследования в условиях закачки горячей воды до 120 °С и повышать коэффициент извлечения высоковязкой нефти из модели пласта на 7 %...34 %.

3. Выявлена способность разработанных полимерных составов на основе поливинилового спирта, представляющих собой смесь

водного раствора термопластичного полимера и биполярного апротонного растворителя с добавлением ацетата хрома трехвалентного или катализаторного шлама, создавать блокирующий экран в поровом пространстве объекта исследования в условиях закачки водяного пара до 250 °С и повышать коэффициент извлечения сверхвязкой нефти из модели пласта на 12 %...28 % и 41 %...49 % соответственно.

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 и выбору термостабильных полимерных составов для паро- и водоизоляционных работ на месторождениях ВВН и СВН с учетом уточненного механизма взаимовлияния составляющих компонентов полимерного состава и их взаимодействия с пластовой системой.

2. Способность повышать термостабильность водных растворов полимеров достигается за счет добавления хромсодержащих реагентов и позволяет использовать разработанные полимерные составы при комбинированном воздействии на залежи ВВН и СВН – тепловом и физико-химическом.

3. Разработаны термостойкие составы для проведения паро- и водоизоляционных работ на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти на основе синтетических полимеров: 1-й состав – на основе полимера акрилового ряда с добавлением катализаторного шлама отходов промпредприятий, 2-й состав – на основе поливинилового спирта (ПВС) с добавлением ацетата хрома, 3-й состав - на основе ПВС с добавлением катализаторного шлама отходов промпредприятий. Разработанные составы на основе синтетических полимеров обладают широким диапазоном физико-химических, реологических и фильтрационных характеристик.

4. Сформированы рекомендации по закачке разработанных полимерных составов в нагнетательные скважины с горизонтальным окончанием, эксплуатирующие залежи ВВН и СВН.

5. Материалы и результаты работы были использованы в деятельности компании ООО «ПМ-ГРУПП» при реализации работ в рамках физико-химических методов увеличения нефтеотдачи пластов (акт внедрения от 04.06.2024 г.).

Методология и методы исследования

Решение поставленных в работе задач осуществлялось путем физического и гидродинамического моделирования процессов, протекающих в объекте исследования, с применением сертифицированного лабораторного оборудования и с привлечением современных программных продуктов.

Положения, выносимые на защиту

1. Добавление хромсодержащих реагентов: ацетата хрома III и катализаторного шлама сектора переработки минерального сырья к водным растворам ПАА и ПВС улучшает их термостабильность в условиях 120 °С...250 °С, что позволяет рекомендовать применение получаемых таким образом полимерных составов для повышения коэффициента извлечения ВВН и СВН путем перераспределения фильтрационных потоков за счет создания блокирующего экрана при тепловом воздействии на неоднородные пласты терригенных коллекторов.

2. Обоснована технология водоизоляционных работ в неоднородных терригенных коллекторах, включающая использование поли-

мерного состава с добавлением катализаторного шлама и позволяющая создавать блокирующий экран в условиях закачки горячей воды до 120 °С и повышать коэффициент извлечения высоковязкой нефти из модели пласта.

3. Обоснована технология пароизоляционных работ в неоднородных терригенных коллекторах, включающая использование полимерных составов с добавлением ацетата хрома трехвалентного или катализаторного шлама и позволяющая создавать блокирующий экран в условиях закачки водяного пара до 250 °С и повышать коэффициент извлечения сверхвязкой нефти из модели пласта.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями на комплексах современного лабораторного оборудования компаний Vinci Technologies, Coretest Systems Corporation, Rheotest и др., воспроизводимостью полученных результатов.

Апробация диссертационного исследования проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (г. Ухта, 2021 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (г. Ухта, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); Международная научная конференция «Трудноизвлекаемые запасы нефти» (г. Альметьевск, 2024 г.); Ежегодная научно-практическая конференция «Heavy Oil» (г. Самара, 2024 г.).

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 5 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 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретения.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 114 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 31 таблицу.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, а также сотрудникам центра компетенций в области техники и технологий освоения месторождений в Арктических условиях и научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» за помощь в подготовке диссертации.

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 оценена роль трудноизвлекаемых запасов нефти в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации (РФ) и ВВН и СВН в структуре добычи нефти, проведен анализ особенностей геологического строения и обзор опыта разработки месторождений ВВН и СВН, сформулированы основные технологические вызовы нефтедобывающих предприятий в отношении развития технологий добычи ВВН и СВН и масштабирования существующих проектов. Рассмотрены тепловые, физико-химические и комбинированные технологии добычи нефти на их основе. Анализ текущего состояния нефтедобывающей отрасли РФ и особенностей разработки

месторождений с неоднородными терригенными породами-коллекторами, содержащих в себе ВВН и СВН, показал актуальность диссертационных исследований, посвященных обоснованию и разработке технологий регулирования фильтрационных потоков.

Рассмотрение основных технологий добычи ВВН и СВН и известных водоизолирующих рецептур, используемых при регулировании фильтрационных потоков, показало перспективность применения полимерных составов, позволило выделить их основные недостатки и сформулировать основные требования к разрабатываемым полимерным составам.

Во второй главе приведено описание разработанного программно-аппаратного комплекса по исследованию физико-химических, реологических и фильтрационных свойств полимерных составов в условиях, максимально приближенных к промышленным. Приведено описание методики лабораторных экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных полимерных составов, представляющих собой: 1-й состав – смесь водного раствора полимера акрилового ряда и катализаторного шлама, 2-й состав – смесь водного раствора ПВС и биполярного апротонного растворителя с добавлением ацетата хрома, 3-й состав – смесь водного раствора ПВС и биполярного апротонного растворителя с добавлением шлама.

Представлены результаты по исследованию физико-химических, реологических и фильтрационных свойств разработанных полимерных составов. Приведены результаты лабораторных исследований, характеризующие зависимость времени гелеобразования составов, их прочностных свойств от температурных условий и содержания активных компонентов. Оценена седиментационная устойчивость катализаторного шлама в растворах синтетических полимеров в зависимости от температурных условий, компонентного и количественного состава указанных реагентов. По полученным данным реологических исследований были построены кривые вязкости для 1-го и 2-го, 3-го составов при температурах 20 °С, 60 °С, 120 °С и 20 °С, 120 °С, 250 °С соответственно, построены кривые гелеобразо-

вания при скоростях сдвига, соответствующих продвижению составов в системе устье-скважина-пласт, определены статическое и предельное напряжения сдвига гелей. Проведены фильтрационные исследования на одиночных моделях горных пород по определению остаточного фактора сопротивления. Исследования на модели неоднородного пласта позволили установить коэффициент извлечения ВВН и СВН соответственно горячей водой и водяным паром и его прирост после установки блокирующих экранов в виде разработанных полимерных составов.

В четвертой главе приводится обоснование техники и технологии проведения работ по регулированию фильтрационных потоков в неоднородных терригенных коллекторах с использованием разработанных полимерных составов. Сформированы рекомендации по закачке разработанных составов.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Добавление хромсодержащих реагентов: ацетата хрома III и катализаторного шлама сектора переработки минерального сырья к водным растворам ПАА и ПВС улучшает их термостабильность в условиях 120 °С...250 °С, что позволяет рекомендовать применение получаемых таким образом полимерных составов для повышения коэффициента извлечения ВВН и СВН путем перераспределения фильтрационных потоков за счет создания блокирующего экрана при тепловом воздействии на неоднородные пласты терригенных коллекторов.

Активированный при измельчении до фракции <20 мкм катализаторный шлам, содержащий оксиды хрома и алюминия, взаимодействует с водным раствором ПАА за счет сил электростатического притяжения между отрицательно заряженными макромолекулами анионного ПАА и положительно заряженной поверхностью оксидов. Таким образом, основными механизмами этого физического взаимодействия, приводящими к формированию геля, являются адсорбция и электростерическая стабилизация. Повышение температуры ускоряет процесс диффузии частиц и макромолекул полимера.

Установлено гелеобразование полимерного состава, представляющего собой водный раствор анионного ПАА 1...3 мас. % и катализаторный шлам 1...3 мас. %, образующегося после процесса дегидрирования изобутана. Важно отметить, что компонентный и количественный состав полимер-дисперсной системы (ПДС) подбирался таким образом, чтобы не происходило процесса осаждения шлама. При исследовании гранулометрического состава твердой фазы методом рассева была выявлена гигроскопичная способность указанного шлама во время рассева (влагосодержание не более 10 %). Таким образом, были сформированы рекомендации по хранению шлама с целью предотвращения впитывания влаги.

Исходя из условий прокачиваемости в поровое пространство неоднородного терригенного объекта Русского месторождения – $d_{\text{частиц}} < d_{\text{пор}}$: были отобраны фракции шлама < 20 мкм. По результатам оценки седиментационной устойчивости установлено, что с увеличением молекулярной массы полимера ПДС становится устойчивее.

Образуемый гель характеризуется преобладанием вязкой составляющей над упругой, что объясняет отсутствие пластической прочности. Эффективная вязкость состава при 120 °С с добавлением шлама в соотношении 1:1 больше, чем для 1 и 2 мас. % растворов ПАА в условиях 60 °С. Таким образом, катализаторный шлам выступает в роли термостабилизирующей добавки, улучшающей стабильность реологических характеристик в условиях термодеструкции раствора ПАА (> 60 °С). Термостабилизирующий эффект подтверждается для растворов, приготовленных на модельной воде: состав на основе 2 мас. % ПАА с добавлением шлама набирает вязкость выше при 120 °С, чем при 60 °С для чистого ПАА и состава с добавлением шлама. Составы на модельной воде демонстрируют снижение вязкости от 1,2 до 3,5 раза относительно растворов на дистиллированной воде при 20 °С, 60 °С и 120 °С.

Научное обоснование выбора компонентов полимерного состава на основе ПВС базируется на следующем. Поливиниловый спирт отличается от других синтетических полимеров способностью образовывать кристаллические области в своей структуре, что повышает его термостойкость. Полностью омыленный ПВС плохо растворяется в воде в стандартных условиях, поэтому для его растворения

использовался диметилсульфоксид (ДМСО). Известно, что применение соединений хрома позволяет увеличить термостойкость состава. Использование ацетата хрома позволяет создать прочную структуру за счет связывания 3-х макромолекул полимера.

Механизм гелеобразования составов на основе ПВС можно описать следующим образом. Цепи ПВС сольватируются молекулами ДМСО через водородные связи. При добавлении воды к раствору она конкурирует с ДМСО за взаимодействие с гидроксильными группами ПВС. В полученном растворе ацетат хрома диссоциирует, образуя ионы Cr^{3+} , которые гидратируются. Часть молекул воды в координационной сфере Cr^{3+} замещается ДМСО. По результатам ИК-спектроскопии геля выявлено, что ионы Cr^{3+} образуют координационные связи с $-\text{OH}$ группами ПВС, замещая молекулы воды или ДМСО в своей сольватной оболочке. В результате ион Cr^{3+} связывает гидроксильные группы из разных цепей ПВС, формируя поперечные связи.

При замене ацетата хрома на амфотерные оксиды Al_2O_3 и Cr_2O_3 , содержащиеся в шламе, механизм гелеобразования несколько изменится. При добавлении шлама в раствор ПВС образуется композитный гель с помощью физической сшивки. В этом случае частицы шлама будут выступать как наполнитель полимерной системы. Частицы оксидов хрома и алюминия распределяются в матрице ПВС, формируя сетку за счет адсорбции полимера на поверхности оксидов. Такой гель обладает повышенной механической прочностью. С другой стороны, при нагреве полученной полимерной системы до исследуемых температур Cr_2O_3 , Al_2O_3 и SiO_2 частично гидролизуются в растворителе, образуя сильный акцептор электронных пар Cr^{3+} , Al^{3+} и Si^{4+} , дальнейшее взаимодействие проходит за счет образования хелатных комплексов с гидроксильной группой ПВС (доноры электронных пар).

Установлено, что гелеобразование происходит при нагревании от 120 °С до 250 °С смеси ПВС от 3 до 10 мас. %, растворенного в ДМСО и доведенного водой в соотношении 1:1,25 с добавлением ацетата хрома в количестве от 0,5 до 10 мас. % или катализаторного шлама в количестве от 5 до 10 мас. %. Повышение температуры уско-

ряет процесс сшивки, так как увеличивается подвижность макромолекул и скорость диффузии ионов металлов (рисунок 1). Отметим, что гелеобразования не наступает в составах на основе ПВС без добавления хромсодержащих агентов в исследуемом диапазоне температур и количественного содержания компонентов полимерного состава. Установлено, что пластическая прочность увеличивается с повышением температуры среды (рисунок 1). С увеличением содержания ПВС пластическая прочность увеличивается. Добавление ацетата хрома III также увеличивает пластическую прочность геля от 5 до 8 раз при температурах 250°C и 160°C соответственно при соотношениях сшиватель-полимер от 1:5 до 1:1.

По кривым вязкости полимерных составов с содержанием 3, 5, 10 мас. % ПВС в условиях 20 °C, 120 °C и 250 °C установлены одинаковый тренд для кривых вязкости и равная эффективная вязкость для соотношений сшиватель-полимер от 1:3 до 1:1. При соотношении сшиватель-полимер 1:5 наблюдается уменьшение эффективной вязкости от 1,64 до 2,5 раза для 5 мас. % по ПВС при температурах 20 °C и 250 °C в сравнении с составами в соотношении 1:1 и 1:3. Увеличение содержания полимера приводит к увеличению эффективной вязкости. Так эффективная вязкость составов с содержанием 5 мас. % по ПВС при 120 °C и 3 мас. % по ПВС при 20 °C (сшиватель-полимер 1:3) примерно равная, что подтверждает термостабилизирующий эффект хромсодержащего агента в растворе ПВС. Ввиду относительно ухудшенных прочностных свойств и низкой термостабильности составы с содержанием 3 мас. % по ПВС далее не рассматривались. Важно отметить, что компонентный и количественный состав на основе ПВС с добавлением шлама подбирался таким образом, чтобы не происходил процесс осаждения твердой фазы, предварительно оценивались соотношения полимер-шлам: 1:1, 1:2 и 1:10. Визуально пробы в соотношении 1:1 продемонстрировали высокую и среднюю седиментационную устойчивость в исследуемом диапазоне температур. Аналогично, как при исследовании состава на основе ПАА, твердая фаза размером <20 мкм выбиралась из условий прокачиваемости в поровое пространство: $d_{\text{частиц}} < 24,56 \text{ мкм}$ – для условий неоднородного терригенного объекта Ашальчинского месторождения. Установ-

лено, что с уменьшением размера твердой фазы, время гелеобразования уменьшается, а прочностные характеристики образуемого геля увеличиваются (таблица 1).

Гелеобразование для составов с содержаниями ≥ 5 мас. % по полимеру наступает примерно через 1–4 час после помещения состава в термошкв при 250 °С. В этой связи возможны два механизма:

1) гелеобразование запускается за счет более интенсивного нагрева (250 °С) состава до осаждения твердой фазы. В этом случае шлам остается равномерно диспергирован по всему объему состава, что создает условия образования поперечных связей, установленных ИК-спектроскопией, между более подвижными при нагревании макромолекулами ПВС (содержание < 5 мас. %) и ионами хрома, однако при температуре < 250 °С наблюдается осаждение;

2) за счет более высокой исходной вязкости полимерного состава с содержанием > 5 мас. % по ПВС происходит удержание твердых частиц дисперсной фазы, а затем дальнейшая сшивка.

Таким образом, подтверждается термостабилизирующий эффект при добавлении хромсодержащих агентов в раствор ПВС.

2. Обоснована технология водоизоляционных работ в неоднородных терригенных коллекторах, включающая использование полимерного состава с добавлением катализаторного шлама и позволяющая создавать блокирующий экран в условиях закачки горячей воды до 120 °С и повышать коэффициент извлечения высоковязкой нефти из модели пласта.

Эксперименты на однородной модели пласта проводились на насыпных моделях, подготовленных в соответствии с минералогическим и гранулометрическим составом горных пород эксплуатационного объекта ПК₁₋₇ Русского месторождения (песчаниковый литотип). Фильтрационные эксперименты были проведены с использованием состава при содержании 2 мас. % по ПАА в соотношении 1:1 со шламом, приготовленного на подтоварной воде, ввиду улучшенных седиментационных и реологических свойств относительно минимального содержания по полимеру 1 мас.%. В качестве вытесняющего флюида использовали горячую воду при 80 °С и 120 °С. Закачка ПДС проводилась в количестве 0,1; 0,3 и 0,5 порового

объема (PV) образца. Закачанный в модель пласта состав выдерживался 24 часа при заданных термобарических условиях до окончания процесса гелеобразования.

С увеличением размера оторочки (рисунок 2) увеличивается остаточный фактор сопротивления (ОФС). При увеличении объема оторочки в 3 раза ОФС увеличивается более чем в 2 раза, с увеличением объема оторочки в 5 раз ОФС увеличивается более чем в 10 раз.

При закачке оторочки в количестве 0,5PV было достигнуто полное блокирование составом водонасыщенной модели пласта. Таким образом, закачка ПДС в количестве не более 0,5PV является достаточной для блокирования высокопроницаемых водонасыщенных зон исследуемого объекта. Модель неоднородного терригенного пласта по вертикали создавали с помощью двух параллельно подключенных кернодержателей. По данным фильтрационных экспериментов установлено повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7 %...34 % (рисунок 2).

Результаты фильтрационных экспериментов, в частности, полученные значения ОФС, были учтены при проведении ВИР с применением ПДС на геолого-гидродинамической модели (ГГДМ). При построении ГГДМ использовался сектор объекта исследования, состоящий из 10 скважин (из них 5 ДС), размещенных рядами, среди которых ВИР проводились через нагнетательную скважину, гидродинамически связанную с ДС через канал преимущественной фильтрации. По результатам моделирования на участке воздействия установлен прирост КИН на 1,27 %...1,63 %, рассчитана дополнительная добыча нефти (ДДН) за 20 лет (рисунок 3). Полученные результаты позволяют рекомендовать данную технологию для проведения ВИР на месторождениях ВВН.

По результатам проведенных исследований обоснована технология ВИР в скважинах с горизонтальным окончанием с применением разработанного ПДС на основе высокомолекулярного полимера акрилового ряда (1...3 мас. %) и шлама в соотношении 1:1. В качестве рекомендации по проведению технологии предлагаются: адсорбционный осушитель воздуха для хранения сыпучих реагентов – во избежание слеживания шлама при его хранении; катализаторный шлам

заданного гранулометрического состава относительно объекта закачки ($d_{\text{частиц}} < d_{\text{пор}}$) – для повышения проникающей способности ПДС; в качестве буферной жидкости – раствор 0,1...0,5 мас. % ПАА, который прокачивается единожды в конце цикла закачки ПДС.

3. Обоснована технология пароизоляционных работ в неоднородных терригенных коллекторах, включающая использование полимерных составов с добавлением ацетата хрома трехвалентного или катализаторного шлама и позволяющая создавать блокирующий экран в условиях закачки водяного пара до 250 °С и повышать коэффициент извлечения сверхвязкой нефти из модели пласта.

Фильтрационные эксперименты проводились на битумонасыщенном песчанике шешминского горизонта (P_{2ss}) уфимского яруса (P_{2U}) песчаной пачки Ашальчинского месторождения без моделирования горного давления. Вытесняющий флюид – сухой пар с термодинамическими параметрами на выходе из проточного котельного агрегата не менее 250 °С и степенью сухости не менее 60 %. Расход питательной воды на входе в котельный агрегат составлял 10 мл/мин. Термостойкий состав на основе ПВС с добавлением шлама и термостойкий состав с добавлением ацетата хрома закачивали в модель неоднородного пласта в количестве 0,3PV и 0,5PV и выдерживали при 250 °С в течение 4...8 часов. Затем в модель пласта нагнетали пар до полного его обводнения. По результатам фильтрационных исследований установлен прирост коэффициента извлечения СВН на 12 %...28 % и на 41 %...49 % соответственно для ПВС с добавлением ацетата хрома и шлама.

По результатам проведенных исследований обоснована технология пароизоляционных работ в скважинах с горизонтальным окончанием с применением разработанных термостойких составов на основе ПВС (3...10 мас. %), растворенного в ДМСО и доведенного водой в соотношении 1:1,25 с добавлением ацетата хрома (0,5...10 мас. %) или катализаторного шлама (5...10 мас. %). Для состава с добавлением шлама рекомендации по осуществлению технологии аналогичны, что и для ПДС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи по повышению степени извлечения высоковязкой и сверхвязкой нефти на

месторождениях с неоднородными терригенными коллекторами, разрабатываемых тепловыми методами.

По результатам диссертационного исследования были сделаны основные выводы:

1. При скважинной добыче высоковязких и сверхвязких нефтей с использованием закачки в продуктивный пласт теплоносителей в виде горячей воды или пара одними из основных осложняющих факторов являются опережающее обводнение скважинной продукции и прорывы нагнетаемого в пласт пара к забоям добывающих скважин. При этом основными механизмами обводнения можно назвать: прорывы нагнетаемой в пласт горячей воды по высокопроницаемым зонам и каналам ввиду неоднородности коллекторских свойств по проницаемости; неэффективный расход пара в пяточную и центральную зону нагнетательной скважины при парогравитационном дренировании (SAGD) из-за неоднородности коллекторских свойств по проницаемости. Пар, конденсируясь, превращается в воду, что приводит к чрезмерному объему добываемой воды. В этой связи актуальной научно-практической задачей является разработка и усовершенствование технологий паро- и водоизоляционных работ на месторождениях ВВН и СВН.

2. Современные технологии борьбы с преждевременным обводнением наиболее широко представлены воздействием на пласт составами на основе синтетических полимеров с добавлением сшивателей. Акцентируя внимание на их низких термостабилизирующих свойствах, механической деструкции на высоких скоростях сдвига и химической деструкции в присутствии солей жесткости, разработка и внедрение составов, обладающих улучшенными физико-химическими свойствами, является актуальной.

3. Обоснована методика проведения лабораторных исследований, позволяющая оценивать физико-химические, реологические и фильтрационные свойства разработанных паро- и водоизоляционных составов в условиях их применения для месторождений ВВН и СВН.

4. Обоснована технология водоизоляционных работ на месторождениях ВВН, разрабатываемых вытеснением горячей водой 120 °С, которая заключается в закачке разработанного полимер-дис-

персного состава на основе полимера амида акриловой кислоты с добавлением катализаторного шлама в качестве блокирующей высокопроницаемые зоны и каналы оторочки геля. Результаты проведенных фильтрационных исследований на насыпных моделях керна указывают на высокую водоизолирующую способность разработанного состава (прирост КИН на 7 %...34 %, ОФС составил 9,40...96,51).

5. Обоснована технология пароизоляционных работ на месторождениях СВН, разрабатываемых системой паронагнетательных скважин SAGD, которая заключается в использовании ПВС с добавлением ацетата хрома или катализаторного шлама в качестве блокирующей высокопроницаемые каналы и зоны оторочки образуемого геля. Предложенные полимерные составы с ацетатом хрома и катализаторным шламом способны перераспределять потоки нагнетаемого пара в низкопроницаемую часть, обеспечивая при этом прирост КИН на 12 %...28 % и 41 %...49 % соответственно.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с расширением области применения технологий, улучшением проникающей и изолирующей способности разработанных полимерных составов за счет добавления регулятора гелеобразования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Раупов, И. Р. Повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти. Современное состояние технологий / И.Р. Раупов, **Ю.А. Сытник** // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 7(127). – С. 14-22. – EDN KCLSGI.

2. Раупов, И. Р. Температуроустойчивые составы на основе биополимеров для повышения эффективности разработки месторождений высоковязкой и сверхвязкой нефти / И.Р. Раупов, **Ю.А. Сытник** // Инженер-нефтяник. – 2023. – № 1. – С. 10-15. – EDN ZCOCMM.

3. Разработка седиментационно-устойчивого полимерного состава на основе промышленного отхода / И.Р. Раупов, **Ю.А. Сытник**, Д.В. Ильин [и др.] // Нефтяная провинция. – 2025. – № 1(41). – С. 204-226. – DOI 10.25689/NP.2025.1.204-226. – EDN THNUVY.

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

4. Raupov, I. Design of a Polymer Composition for the Conformance Control in Heterogeneous Reservoirs / I. Raupov, M. Rogachev, **Ju. Sytnik** // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 515. – DOI 10.3390/en16010515. – EDN FSRFMQ.

5. Raupov, I. Overview of Modern Methods and Technologies for the Well Production of High- and Extra-High-Viscous Oil / I. Raupov, M. Rogachev, **Ju. Sytnik** // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P. 1498. – DOI 10.3390/en18061498. – EDN YHWPJT.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент № 2811109 Российская Федерация, МПК МПК C09K 8/508 (2006.01); СПК C09K 8/508 (2023.08). Полимерный состав для водоизоляционных работ. Заявка № 2023114811: заявл. 06.06.2023; опубл. 11.01.2024 / И.Р. Раупов, М.К. Рогачев, **Ю.А. Сытник**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II". – 10 с.

7. Патент № 2815111 Российская Федерация, МПК C09K 8/508 (2006.01), E21B 33/138 (2006.01); СПК C09K 8/508 (2023/08), E21B 33/138 (2023.08). Полимер-дисперсный состав для увеличения охвата неоднородного нефтяного пласта заводнением. Заявка № 2023119852: заявл. 27.07.2023; опубл. 11.03.2024 / И.Р. Раупов, **Ю.А. Сытник**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II". – 8 с.

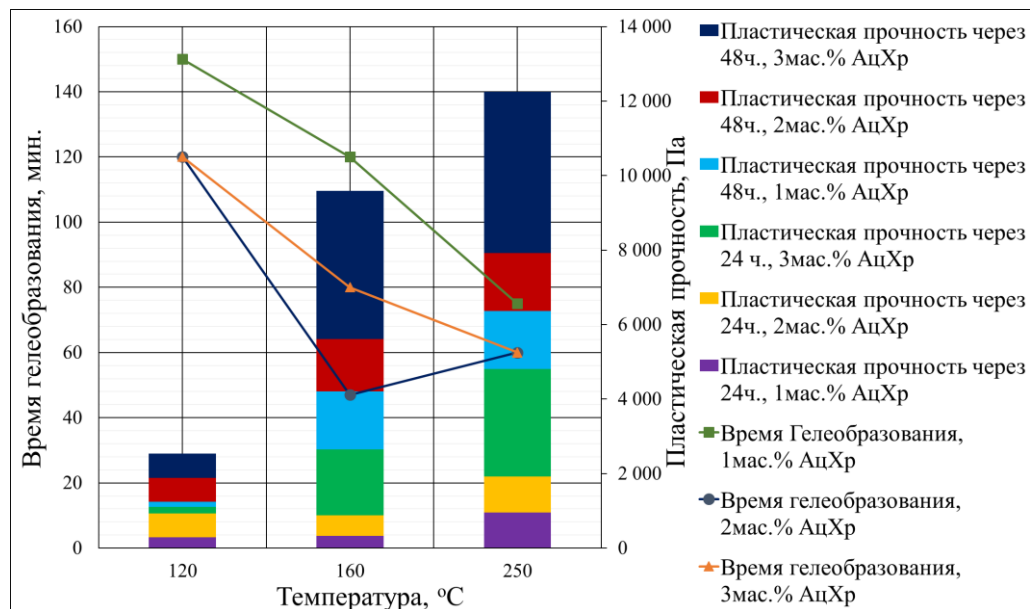


Рисунок 1 – Зависимость времени гелеобразования и пластической прочности от температуры для полимерных составов на основе ПВС 5 мас.% с различным содержанием ацетата хрома

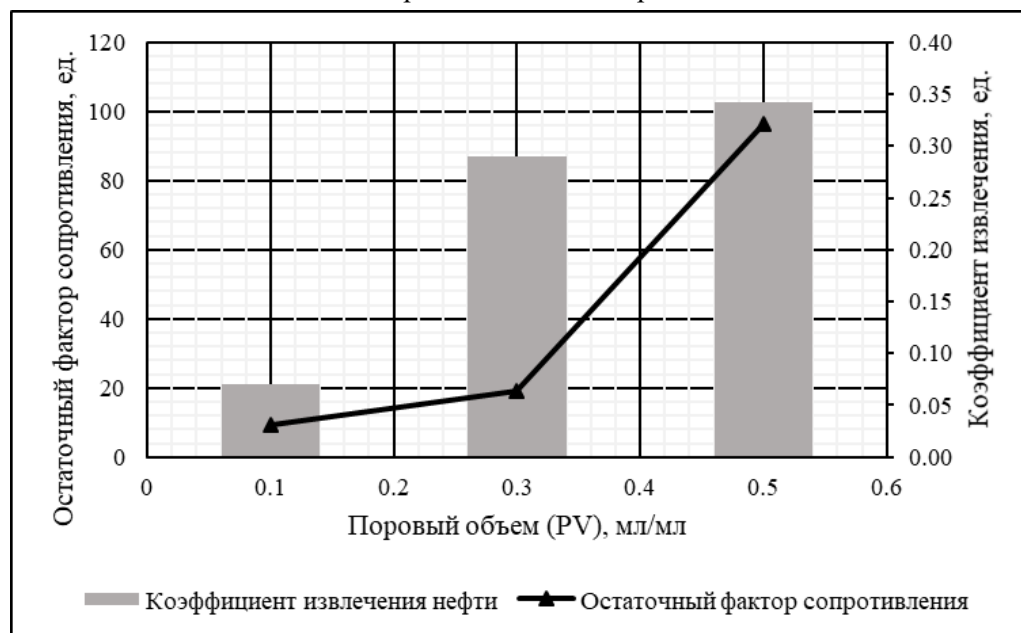


Рисунок 2 – Зависимость КИН и ОФС от порового объема

Таблица 1 – Оценка времени гелеобразования, времени оседания частиц разных фракций и оценка пластической прочности для минимальных и максимальных содержаний по полимеру

№	Компонентный состав, мас. %				Размер фракции шлама, мкм	Время, ч		Пластическая прочность, кПа через	
	ПВС	ДМСО	Вода	Шлам		оседания частиц	гелеобразования	24 ч	72 ч
В стандартных условиях									
1	5	40	50	5	250-500	2	48	31,96	397,47
2	5	40	50	5	94-250	2	48	31,49	102,03
3	5	40	50	5	<94	10	48	135,846	212,26
4	5	40	50	5	<20	18	12	114	239
5	10	35,5	44,5	10	<20	-	12	2242	4743
При 120 °С									
1	5	40	50	5	250-500	1	Загущенный состав через 72 часа	-	-
2	5	40	50	5	94-250	1		-	-
3	5	40	50	5	<94	1,5		-	-
4	5	40	50	5	<20	8		30	Мягкий гель
5	10	35,5	44,5	10	<20	12	28	527	1171
При 250 °С									
1	5	40	50	5	<20	-	3,3	996	255089
2	8	37,3	46,7	8	<20	-	1,5	15943	255089
3	10	35,5	44,5	10	<20	-	1,2	25089	255089

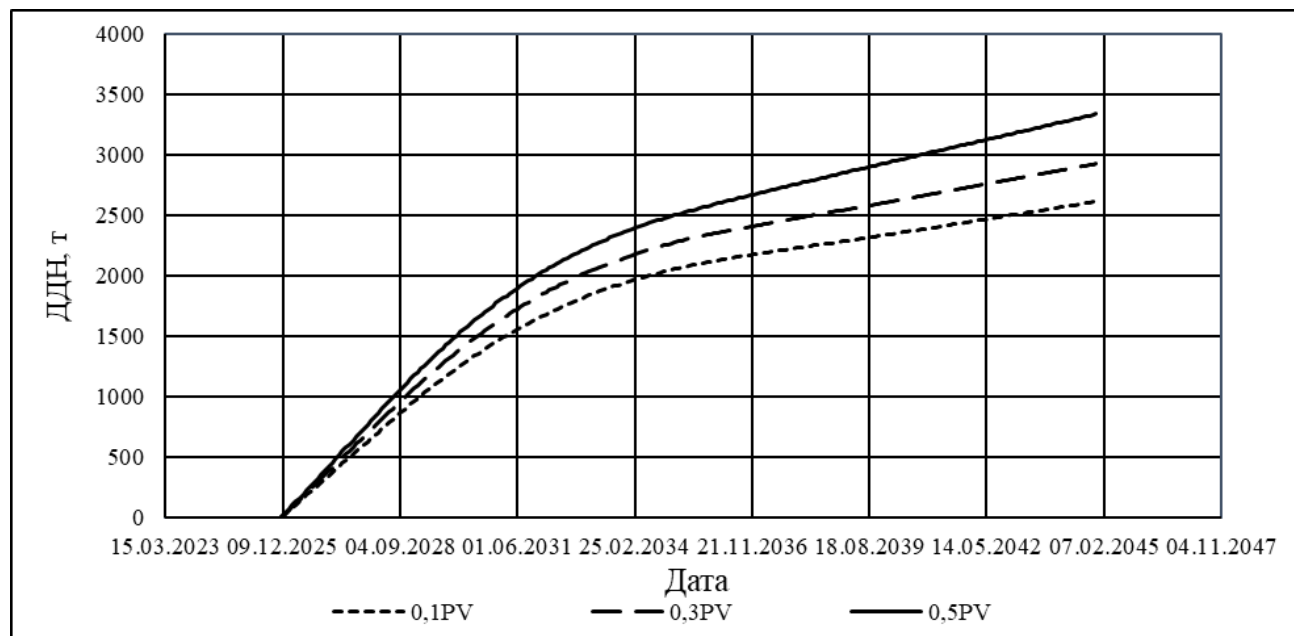


Рисунок 3 – Динамика ДДН за 20 лет