

На правах рукописи

Парфенов Дмитрий Викторович



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С
ГИДРАВЛИЧЕСКИМ РАЗРЫВОМ ПЛАСТА**

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

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Коробов Григорий Юрьевич

Официальные оппоненты:

Гуськова Ирина Алексеевна

доктор технических наук, профессор, государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, профессор;

Гумеров Рустам Расулович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический Центр», центр компетенций по химизации, руководитель направления.

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

Защита диссертации состоится **14 июля 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ 2025.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

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

Автореферат разослан 14 мая 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



САВЕНОК
Ольга Вадимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка месторождений нефти с высоким содержанием парафинов может сопровождаться формированием твердых органических отложений. При этом образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) может происходить в призабойной зоне пласта (ПЗП) и на поверхности внутрискважинного оборудования, что негативно влияет на фильтрационно-емкостные свойства коллектора и продуктивность скважин. В свою очередь, проведение мероприятий с целью устранения нежелательных последствий образования АСПО приводит к снижению коэффициента эксплуатации скважин.

На сегодняшний день распространенным способом предотвращения образования отложений парафина является использование ингибиторов формирования АСПО. Для применяемых сегодня технологий непрерывной и периодической подачи реагентов характерно следующее: резкое снижение ингибирующего эффекта при отклонениях от утвержденной технологической схемы; регулярное обслуживание оборудования для постоянной дозированной подачи реагентов; периодическое проведение мероприятий по подаче ингибитора в затрубное пространство, загрузке скважинных контейнеров, нагнетанию и задавливанию жидкого ингибитора в ПЗП.

В связи с этим актуальным является разработка эффективного и технологичного способа подачи ингибитора формирования АСПО, исключающего использование специализированного оборудования и проведения дополнительных технологических мероприятий – подача реагента может осуществляться при проведении гидравлического разрыва пласта (ГРП) в трещину ГРП в составе модифицированного проппанта.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование проблемы АСПО внесли следующие отечественные и зарубежные ученые: Р.А. Абдуллин, А.А. Абрамзон, Л.К. Алтунина, Г.А. Бабалян, Е.И. Богомольный, Ф.С. Гарифуллин, В.Н. Глущенко, И.А. Гуськова, В.В. Девликамов, М.Ю. Доломатов, Н.Г. Ибрагимов, Я.М. Каган, Г.Ю. Коробов, Б.А. Мазепа, Р.А. Максудов, А.Х. Мирзаджанзаде, И.Т. Мищенко, М.Х. Мусабилов, В.А. Рагулин, В.А. Рассказов, Ю.В. Ревизский, М.К. Рогачев, В.А. Сахаров,

М.А. Силин, Б.М. Сучков, А.Г. Телин, В.П. Тронов, З.А. Хабибуллин, А.Я. Хавкин, Н.И. Хисамутдинов, Д.М. Шейх-Али, J.A. Ajienka, T.S. Brown, R. Coutinho, J.L. Creek, F. Fleyfel, W. Frenier, R. Hoffmann, K.J. Leontaritis, G. Mansoori, O.C. Mullins и др.

Несмотря на то, что данная проблема рассмотрена с разных сторон (условия и механизмы формирования отложений, способы предотвращения и удаления), на данный момент остаются вопросы, требующие углубленного изучения. В связи с этим встает вопрос об актуальности проведения исследования, посвященного повышению эффективности эксплуатации нефтяных скважин в условиях образования органических отложений.

Объект исследования – нефтяные скважины, эксплуатирующиеся с применением гидравлического разрыва пласта, в условиях формирования асфальтосмолопарафиновых отложений.

Предмет исследования – физико-химические процессы, протекающие в трещине ГРП после подачи в нее высокомолекулярного вещества, и оценка его ингибирующей способности по отношению к асфальтосмолопарафиновым отложениям.

Цель работы – повышение эффективности технологий предотвращения образования асфальтосмолопарафиновых отложений в нефтяных скважинах, эксплуатируемых с применением гидравлического разрыва пласта.

Идея работы. Для достижения поставленной цели в трещину ГРП подается твердофазный ингибитор образования асфальтосмолопарафиновых отложений в составе модифицированного проппанта.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современных способов предупреждения и удаления твердых органических отложений, применяемых с целью повышения эффективности эксплуатации скважин.
2. Разработать способ борьбы с образованием АСПО за счет ингибирования путем подачи реагента в трещину ГРП.
3. Разработать способ насыщения пористого проппанта твердофазным ингибирующим веществом с возможностью последующего его высвобождения при контакте с добываемой продукцией.

4. Провести экспериментальные исследования физико-химических процессов, протекающих при высвобождении твердого ингибирующего вещества из модифицированного проппанта.

5. Описать механизм высвобождения твердого ингибирующего вещества из модифицированного проппанта в процессе ингибирования.

6. Разработать технологию предотвращения формирования АСПО в нефтяных скважинах, эксплуатируемых с применением гидравлического разрыва пласта, основанную на подаче ингибитора в трещину ГРП.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально установлено, что при добавлении к высокопарафинистой нефти сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) в количестве более 5 г/т снижается температура застывания нефти, ее вязкость при температурах ниже точки насыщения нефти парафином и интенсивность образования отложений на поверхности холодного стержня, что свидетельствует об ингибирующей способности данного химического реагента по отношению к АСПО.

2. Выявлена и экспериментально подтверждена способность пористых проппантоподобных частиц, содержащих в порах твердофазный сополимер этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %), высвобождать в поток нефти химический реагент за счет растворения поверхностного слоя сополимера и экстрагирования в системе «твердый сополимер этилена и винилацетата – нефть» при их омывании.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений по пункту 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 раз-

вития 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».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлен механизм высвобождения твердого сополимера этилена и винилацетата из пористой структуры частицы проппанта, заключающийся в одновременном растворении поверхностного слоя сополимера и экстрагировании в системе «твердый сополимер этилена и винилацетата – нефть».

2. Разработан способ насыщения пористого проппанта твердофазным сополимером этилена и винилацетата, заключающийся в насыщении частиц раствором сополимера этилена и винилацетата в ксилоле с последующим удалением растворителя.

3. Разработано и запатентовано (патент на изобретение № 2818386) устройство для насыщения пористого проппанта твердофазным ингибирующим веществом.

4. Разработан способ ингибирования формирования АСПО, основанный на подаче в трещину ГРП модифицированного проппанта, одновременно выполняющего функцию расклинивающего наполнителя и являющегося источником ингибитора.

5. Материалы и результаты были использованы при формировании и актуализации методических рекомендаций компании ООО «ПМ-ГРУПП» по тестированию образцов полимерных составов, а также при моделировании процесса адсорбции и десорбции высокомолекулярных веществ на горных породах (акт внедрения от 07.05.2024).

Методология и методы исследования. Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических исследований, а также со стандартными и разработанными методиками проведения экспериментальных исследований (исследования физических свойств пористых частиц, исследования реологических и физических свойств нефти, физическое моделирование процесса ингибирования образования АСПО и др.). Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. При разработке ингибиторов образования АСПО следует учитывать установленную способность сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) при добавлении к высокопарафинистой нефти снижать интенсивность формирования АСПО на поверхности холодного стержня, температуру застывания нефти и ее вязкость при температурах ниже точки насыщения нефти парафином.

2. Установление способности пористых проппантоподобных частиц, содержащих в порах твердофазный сополимер этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %), высвобождать его в поток нефти при их омывании, позволило разработать технологию предотвращения формирования АСПО, основанную на ингибировании путем подачи в трещину ГРП твердофазного ингибитора образования АСПО в составе модифицированного проппанта.

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

Апробация результатов за последние 3 года проведена на 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 15-16 ноября 2022); XXIV Международная молодёжная научная конференция «Севергеозкотех-2023» (г. Ухта, 30-31 марта 2023); Всероссийская конференция «Передовые технологии нефтегазовой отрасли» (г. Сургут, 24 ноября 2023); 6-я научно-техническая конференция «Повышение эффективности эксплуатации малодебитного фонда скважин в осложненных условиях 2024» (г. Москва, 08-09 октября 2024); Научная конферен-

ция студентов и аспирантов «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 21-25 октября 2024); XX Всероссийская конференция-конкурс «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 01-07 декабря 2024).

Личный вклад автора. Анализ и обобщение ранее опубликованных материалов по теме диссертационного исследования; постановка задач исследования; проведение экспериментов на лабораторной базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II; математическое моделирование физико-химических процессов; обработка и интерпретация экспериментальных данных; подготовка текста работы, формулирование выводов и основных защищаемых положений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 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 3 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 123 наименования. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 17 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю – доценту кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Коробову Григорию Юрьевичу, всем сотрудникам кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений за оказанную помощь, а также к.т.н. Сандыге Михаилу Сергеевичу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

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 описаны механизмы формирования АСПО в поровом пространстве и на поверхности лифтовых труб. Представлен анализ способов предотвращения и удаления отложений в добывающих скважинах и в ПЗП. Представлена классификация ингибиторов формирования АСПО в зависимости от механизма их действия. Описаны существующие способы подачи и дозирования ингибиторов образования АСПО в скважину, в ПЗП и в трещину ГРП, указаны факторы, влияющие на эффективность технологии ингибирования.

Во второй главе представлены методика подбора проппантоподобных частиц и результаты исследования их физических свойств (открытая пористость, сопротивление раздавливанию), методика подбора ингибирующего вещества и результаты исследования по оценке его эффективности (влияние на температуру застывания нефти, температуру насыщения нефти парафином, интенсивность формирования АСПО и эффективную вязкость нефти). Описан способ насыщения пористого проппанта твердофазным ингибитором. Представлены результаты исследования взаимовлияния модифицированного проппанта и жидкости ГРП. Разработан способ ингибирования образования АСПО за счет подачи твердофазного ингибитора в трещину ГРП.

В третьей главе приведена методика физического моделирования процесса ингибирования для оценки интенсивности высвобождения твердого ингибитора из пористой структуры частиц проппанта при их омывании потоком нефти. Представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований, характеризующие зависимость высвобождения твердого ингибитора от расхода оmyвающей нефти, доли модифицированного проппанта и доли воды в водонефтяном потоке. Описан механизм высвобождения ингибитора из пористой структуры частицы проппанта, заключающийся в растворении и экстрагировании твердого вещества.

В четвертой главе приведено обоснование технологии предотвращения формирования АСПО за счет ингибирования с использованием разработанного способа подачи реагента в трещину

ГРП в составе модифицированного проппанта. Описана технология насыщения частиц пористого проппанта твердофазным ингибирующим веществом. Описана технология подачи модифицированного проппанта при проведении ГРП.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. При разработке ингибиторов образования АСПО следует учитывать установленную способность сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) при добавлении к высокопарафинистой нефти снижать интенсивность формирования АСПО на поверхности холодного стержня, температуру застывания нефти и ее вязкость при температурах ниже точки насыщения нефти парафином.

Химические методы предупреждения образования АСПО заключаются в подаче различными способами в скважину или ПЗП реагентов, снижающих интенсивность формирования отложений за счет влияния на следующие свойства нефти (одно или несколько): уменьшение температуры насыщения нефти парафином и температуры застывания нефти, снижение вязкости нефти при температурах ниже точки насыщения нефти парафином.

Сополимер этилена и винилацетата (сэвилен) с химической формулой $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n(-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3\text{COO})\text{H}-)_m$, в молекуле которого за неполярную часть отвечают этиленовые звенья, а за полярную – ацетатная часть винилацетата, является высокомолекулярным соединением, обладающим поверхностно-активными свойствами и способным адсорбироваться на поверхности кристаллов парафина. При этом полярная часть молекулы способствует ослаблению взаимодействия с окружающими кристаллами и препятствует дальнейшей агломерации.

С целью оценки влияния сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) на свойства высокопарафинистой нефти была проведена серия лабораторных экспериментов по определению в зависимости от концентрации сополимера следующих характеристик: эффективная вязкость и температура застывания

нефти, температура насыщения нефти парафином, интенсивность образования отложений методом «холодного стержня».

В качестве исследуемой нефти выступала высокопарафинистая нефть с содержанием парафина 10,94 % масс.

Сополимер этилена и винилацетата добавлялся в пробу нефти при температуре выше точки насыщения исходной нефти парафином в концентрации 0,0005...0,01 % масс.

Эффективная вязкость исследуемых проб нефти определялась на ротационном реометре при температурах 10...50 °С. Температура насыщения нефти парафином определялась графическим методом по точке излома графика зависимости вязкости от натурального логарифма температуры. Температура застывания нефти определялась согласно ГОСТ 20287-91 (метод Б).

Полученные результаты исследований эффективной вязкости нефти, температуры застывания, температуры насыщения нефти парафином и массы отложений, образовавшихся на поверхности «холодного стержня» при добавлении сополимера этилена и винилацетата в концентрации до 0,01 % масс., представлены на рисунках 1 и 2.

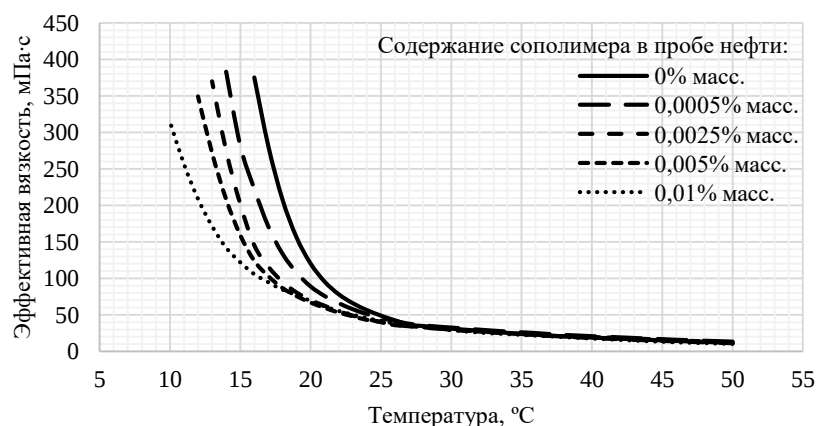


Рисунок 1 – Эффективная вязкость высокопарафинистой нефти при разной концентрации сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %)

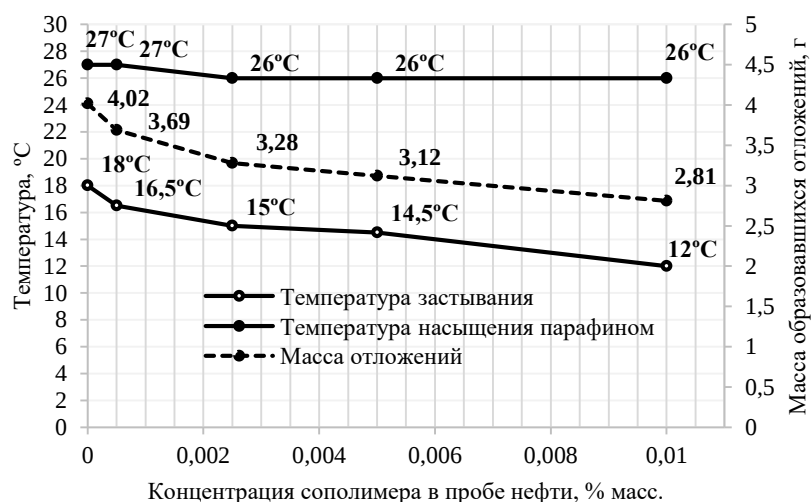


Рисунок 2 – Влияние сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) на свойства высокопарафинистой нефти

По результатам проведенных исследований установлено, что добавление сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) в концентрации 0,01 % масс. способствует снижению температуры насыщения нефти парафином на 1 °C, снижению температуры застывания нефти на 6 °C, уменьшению массы образовавшихся отложений на поверхности «холодного стержня» на 30 %, а также снижению вязкости высокопарафинистой нефти при температурах 16...26 °C на 10...72 %.

2. Установление способности пористых проппантоподобных частиц, содержащих в порах твердофазный сополимер этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %), высвобождать его в поток нефти при их омывании, позволило разработать технологию предотвращения формирования АСПО, основанную на ингибировании путем подачи в трещину ГРП твердофазного ингибитора образования АСПО в составе модифицированного проппанта.

Эффективность технологии ингибирования зависит от следующих основных факторов: состав ингибитора, область подачи реагента, периодичность обработки, удельный расход реагента/дозировка. Выбор области подачи ингибитора зависит от участка начала процесса образования твердых частиц парафина, поскольку большинство реагентов показывают свою максимальную эффективность при вводе в нефть с растворенным парафином. Соответственно, распределение температуры в системе «пласт – скважина» является определяющим фактором выбора области подачи ингибитора.

При всем при этом рациональным технологическим решением является подача ингибитора формирования АСПО непосредственно в продуктивный пласт, а именно в трещину ГРП. Суть разработанной технологии предотвращения образования АСПО в скважинах, эксплуатируемых с ГРП, заключается в подаче в трещину ГРП модифицированного пористого проппанта, одновременно выполняющего функцию и расклинивающего агента, и носителя ингибитора. При этом частицы пористого проппанта, содержащие в порах твердофазное ингибирующее вещество, высвобождают реагент в поток нефти при их омывании. С целью обеспечения реализации способа ингибирования были рассмотрены следующие вопросы.

Во-первых, выбор частиц-носителей основывался на доступности материала, прочностных характеристиках, размере, форме и открытой пористости частиц. В качестве носителя применялись сферические керамические частицы размером 1000...2000 мкм с открытой пористостью 12,96 %, измеренной при вакуумировании дистиллированной водой. Механическая прочность частиц позволила обеспечить предъявляемое проппанту сопротивление раздавливанию (ГОСТ Р 51761-2013) только с добавлением к навеске высокопрочного проппанта в соотношении пористых и высокопрочных частиц 50/50, 33/67, 25/75 при давлениях 34,5 МПа; 51,7 МПа; 68,9 МПа соответственно.

Во-вторых, подбор ингибирующего вещества для последующего насыщения им пористых частиц основывался на следующих факторах: ингибирующий эффект реагента, растворимость в углеводородной и водной фазах, опыт применения и доступность, токсичность и экологичность. Результаты лабораторных исследований, представленные выше, показали, что добавление сополимера этилена

и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) способствует уменьшению температуры застывания нефти и снижению эффективной вязкости нефти. Также низкая растворимость сополимера в воде обеспечивает отсутствие потерь ингибирующего вещества при омывании модифицированного проппанта жидкостью ГРП на водной основе и пластовой водой.

В-третьих, насыщение пористых частиц твердофазным сополимером этилена и винилацетата осуществляется путем вакуумной пропитки жидкостью насыщения, представляющей собой раствор сополимера в ксилоле (10 % масс.), с последующим донасыщением при давлении 10 МПа и удалением растворителя в ротационном испарителе. В результате получают пористые частицы с твердофазным сополимером этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %), включенным в них и образующим поверхностный слой – модифицированный проппант.

В-четвертых, взаимовлияние модифицированного проппанта и жидкости-песконосителя на гуаровой основе оценивалось путем проведения лабораторных исследований вязкости линейного и сшитого гелей, времени сшивки, степени деструкции и пескоудерживающей способности геля. Результаты показали отсутствие влияния сополимера на функциональность жидкости-песконосителя.

Поскольку принцип ингибирования разработанного способа основан на саморегулирующей подаче реагента, было оценено влияние следующих факторов на продолжительность его высвобождения и период эффективной защиты:

- средний дебит добывающей скважины после проведения мероприятия по ГРП;
- доля модифицированного проппанта в общей массе расклинивающего агента;
- доля воды в водонефтяном потоке, омывающим модифицированный проппант.

Для оценки кинетики высвобождения сополимера этилена и винилацетата были проведены фильтрационные исследования, моделирующие процесс ингибирования.

В системе создавались температурные условия, обеспечивающие отсутствие кристаллов парафина в исследуемой нефти. Имитация трещины ГРП осуществлялась путем расположения навески расклинивающего материала с некоторым соотношением инертного и модифицированного проппанта в загрузочной колонке, представляющей собой стальную трубку диаметром 6,86 мм. Затем через полученную матрицу проппанта в обратном направлении прокачивалось три поровых объема продуктов деструкции жидкости-песконосителя с целью моделирования проведения операции по гидравлическому разрыву пласта. Последующая фильтрация исследуемой нефти или водонефтяной смеси через моделируемую матрицу осуществлялась в прямом направлении с постоянным расходом. При этом на выходе из загрузочной колонки периодически отбиралась проба для дальнейшей оценки концентрации ингибитора.

Концентрация сополимера этилена и винилацетата в пробах нефти, отобранных в процессе фильтрации, определялась графическим способом на основании эталонной кривой – зависимости вязкости нефти при 16 °С от концентрации сополимера (рисунок 3).

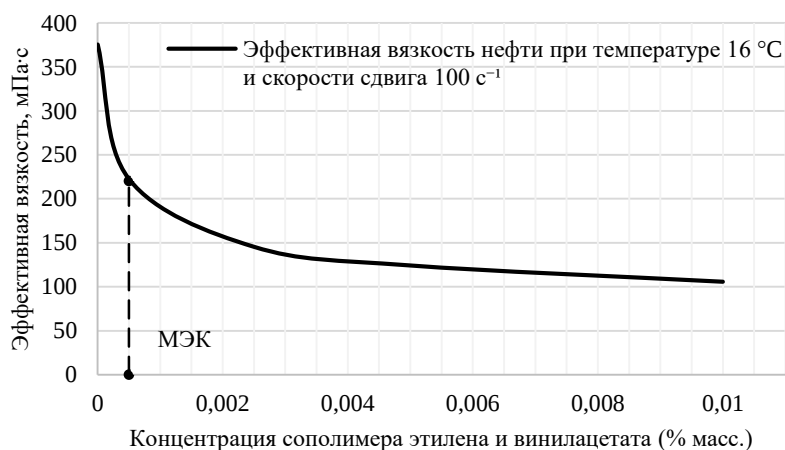


Рисунок 3 – Кривая для определения концентрации сополимера этилена и винилацетата в нефти

На основании полученной кривой концентрация 0,0005 % масс. была выбрана как минимальная эффективная концентрация

(МЭК), обеспечивающая оптимальный уровень ингибирования с учетом расхода реагента.

Условия проведения фильтрационных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия проведения фильтрационных исследований

Эксп. №	Соотношение массы модифицированного и инертного проппанта	Расход, см ³ /мин			Температура, °С
		Н	В	Σ	
1	100/0	2,1	-	2,1	42
2	100/0	4,2	-	4,2	
3	100/0	8,4	-	8,4	
4	100/0	12,6	-	12,6	
5	50/50	8,4	-	8,4	
6	25/75	8,4	-	8,4	
7	100/0	4,2	4,2	8,4	

* Н – нефть; В – модель пластовой воды; Σ – суммарный.

Результаты проведенного комплекса исследований по оценке кинетики высвобождения твердофазного сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %) из частиц модифицированного проппанта представлены на рисунках 4, 5 и 6.

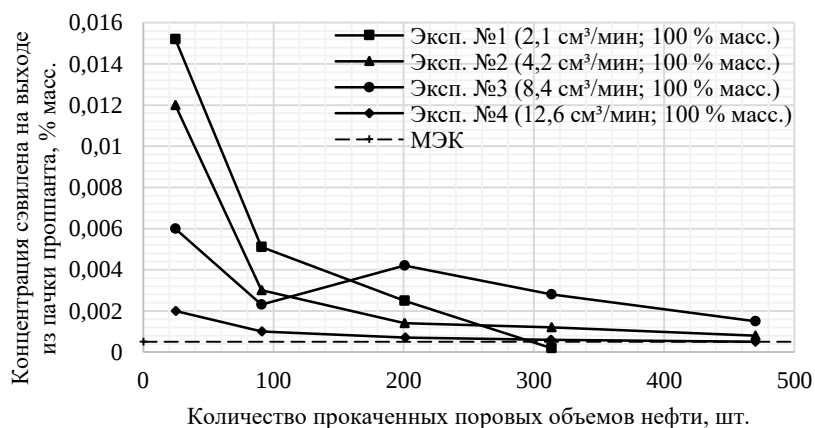


Рисунок 4 – Профиль высвобождения сополимера этилена и винилацетата при разном расходе нефти

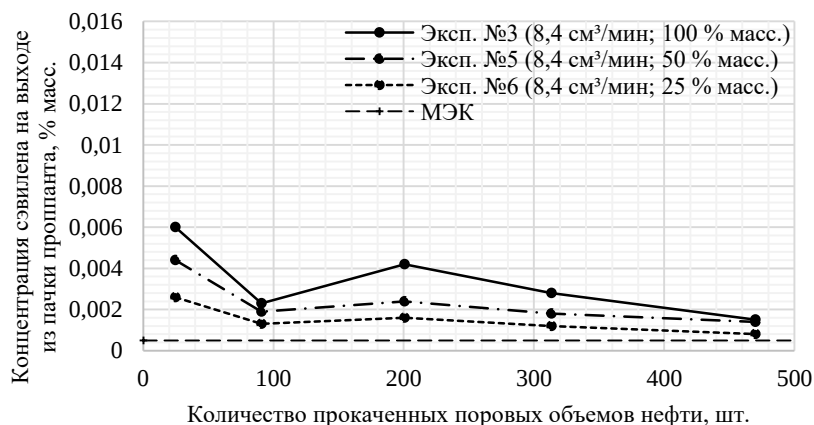


Рисунок 5 – Профиль высвобождения сополимера этилена и винилацетата при разном соотношении частиц 100/0, 50/50 и 25/75

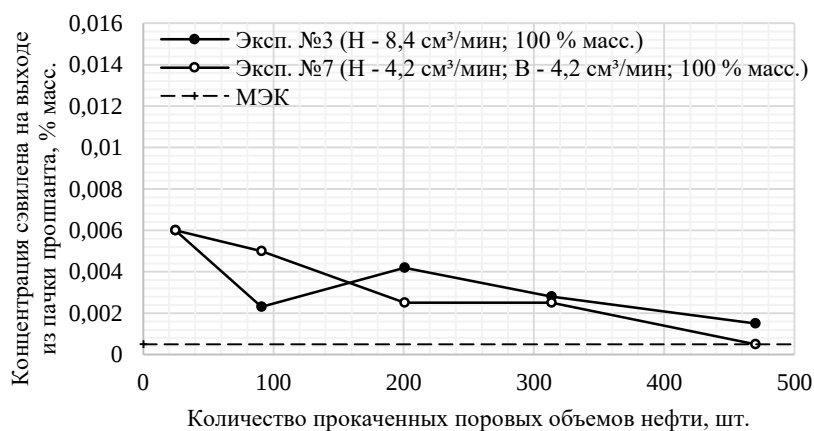


Рисунок 6 – Профиль высвобождения сополимера этилена и винилацетата при наличии водонефтяного потока и без него

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при контакте высокопарафинистой нефти с модифицированным пропаном происходит высвобождение сополимера этилена и винилацетата, что обеспечивает дозирование реагента в поток жидкости и поддержание концентрации ингибитора в нефти выше

значения МЭК после прокачивания более 470 поровых объемов модельной матрицы проппанта.

Разработанная технология предотвращения образования АСПО заключается в замене части подаваемого в трещину проппанта на модифицированный, содержащий твердофазный сополимер этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %). При этом применение подогретых жидкостей при проведении ГРП позволяет избежать снижения температуры в пласте и, как следствие, предотвратить формирования отложений в процессе проведения гидравлического разрыва пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи по повышению эффективности технологии предотвращения формирования АСПО в нефтяных скважинах, эксплуатируемых с применением гидравлического разрыва пласта, путем подачи в трещину ГРП твердофазного ингибитора в составе модифицированного проппанта.

По результатам диссертационного исследования были сделаны основные выводы:

1. Выполненный анализ современных технологий предотвращения образования АСПО в нефтяных скважинах показал эффективность подачи ингибиторов АСПО в продуктивный пласт, а именно в ПЗП и трещину ГРП.

2. Разработан способ ингибирования образования АСПО, основанный на подаче в трещину ГРП модифицированного проппанта, выполняющего одновременно функцию и расклинивающего агента, и носителя твердофазного ингибитора – сополимера этилена и винилацетата (с массовой долей винилацетата 26...30 %), с последующим высвобождением ингибитора и его диффузией в нефть, омывающую проппантные частицы.

3. Разработан способ насыщения пористого проппанта твердофазным сополимером этилена и винилацетата, заключающийся в насыщении частиц раствором сополимера в ксилоле с последующим удалением растворителя. В результате получают модифицированные частицы проппанта, содержащие твердофазный сополимер этилена и винилацетата в порах и в виде поверхностного слоя.

4. Результаты фильтрационных исследований, моделирующих процесс ингибирования, подтвердили процесс дозирования сополимера и этилена в поток нефти при контакте с частицами модифицированного проппанта. В ходе исследования кинетики высвобождения реагента были выявлены следующие закономерности:

- увеличение скорости фильтрации способствует росту интенсивности растворения и экстрагирования сополимера;
- уменьшение доли модифицированного проппанта приводит к снижению массы высвободившегося реагента;
- присутствие пластовой воды в водонефтяном потоке приводит к снижению продолжительности эффективного действия ингибитора.

5. Установлен механизм высвобождения твердого сополимера этилена и винилацетата из пористой частицы модифицированного проппанта, заключающийся в одновременном растворении поверхностного слоя сополимера и экстрагировании в системе «твердый сополимер этилена и винилацетата – нефть».

6. Разработана технология предотвращения формирования АСПО в нефтяных скважинах, эксплуатируемых с применением ГРП, основанная на эффективном и технологичном способе подачи ингибитора, исключающем использование специализированного оборудования и проведение дополнительных технологических мероприятий – подача реагента осуществляется при проведении гидравлического разрыва пласта в трещину ГРП в составе модифицированного проппанта.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с разработкой способов увеличения продолжительности высвобождения из модифицированного проппанта ингибирующего вещества и периода его эффективного действия, а также с расширением области применения технологии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Коробов, Г.Ю. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений Методики исследования / Г.Ю. Коробов,

Д.В. Парфенов // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 8(128). – С. 22-28.

2. Коробов, Г.Ю. Проблема мониторинга остаточного содержания ингибиторов АСПО / Г.Ю. Коробов, **Д.В. Парфенов**, В.Т. Нгуен // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2023. – № 12(144). – С. 68-72.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS.

3. Nguyen, V.T. A comprehensive method for determining the dewaxing interval period in gas lift wells / V.T. Nguyen, T.V. Pham, M.K. Rogachev, G.Y. Korobov, **D.V. Parfenov**, A.O. Zhurkevich, S.R. Islamov // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2023. – № 4. – P. 1163-1179.

4. Коробов, Г.Ю. Механизмы образования асфальтосмолопарафиновых отложений и факторы интенсивности их формирования / Г.Ю. Коробов, **Д.В. Парфенов**, В.Т. Нгуен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 103-116.

5. Korobov, G.Y. Long-term Inhibition of Paraffin Deposits Using Porous Ceramic Proppant Containing Solid Ethylene-vinyl Acetate / G.Y. Korobov, **D.V. Parfenov**, V.T. Nguyen // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2025. – № 38(8). – P. 1887-1897.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент 2818386 Российская Федерация, МПК: C09K 8/80 (2006.01), G01N 15/08 (2006.01); СПК C09K 8/80 (2024.01), G01N 15/08 (2024.01). Устройство для насыщения пористого проппанта ингибирующим веществом. Заявка № 2023130237: заявл. 21.11.2023; опубл. 02.05.2024 / Г.Ю. Коробов, В.Т. Нгуен, **Д.В. Парфенов**, Д.Г. Подопрigора; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13 с.