На правах рукописи

БАБИЦКАЯ КСЕНИЯ ИГОРЕВНА

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ВОДОПРИТОКА МИЦЕЛЛЯРНЫМИ РАСТВОРАМИ СЕЛЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Специальность 25.00.17 –

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Бугульма – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Научный руководитель: кандидат химических наук
Коновалов Виктор Викторович

Официальные оппоненты: **Алтунина Любовь Константиновна**
доктор технических наук, профессор, Институт химии нефти СО РАН, заведующая лабораторией коллоидной химии нефти

Толоконский Сергей Игоревич
кандидат технических наук, АО «ВНИИнефть», директор центра создания технологий интенсификации добычи

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится 15 февраля 2018 г. в 13 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 222.018.01 при Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма ул. М.Джалиля, дом 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти www.tatnipi.ru

Автореферат разослан ___ декабря 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Львова Ирина Вячеславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последнее время в России наблюдается значительный рост доли трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ), которая достигает 20% в общем балансе запасов. Эффективная разработка ТРИЗ требует совершенствования существующих и разработки новых технологических решений для интенсификации добычи нефти в осложненных геолого-физических условиях.

К настоящему моменту предложено множество технологий разработки месторождений высоковязких нефтей, из которых наиболее часто используются тепловые и физико-химические методы, а также их различные сочетания.

Основой для разработки физико-химических способов стимуляции скважин и пластов является применение целого комплекса химических соединений, таких как поверхностно-активные вещества (ПАВ), полимеры, органические и неорганические кислоты, углеводородные растворители, соли и др. В последнее время множество работ посвящено применению смесей ПАВ различных классов. Синергетические эффекты смесевых ПАВ позволяют существенным образом изменять физико-химические характеристики составов, обеспечивая им необходимые технологические свойства.

Одной из задач, имеющих важное прикладное значение, является повышение эффективности добычи высоковязкой нефти из терригенных пластов с подошвенными водами. Интенсификация добычи нефти в указанных условиях может быть обеспечена использованием комплексных технологий, направленных на снижение поступления пластовой воды к забою скважины, улучшение реологических характеристик пластовой нефти и фильтрационных характеристик пласта.

Степень разработанности темы

Значительный вклад в развитие методов химического воздействия на нефтяные пласты внесли следующие ученые: Алтунина Л.К., Бабалян Г.А., Башкирцева Н.Ю., Горбунов А.Т., Городнов В.П., Девликамов В.В., Дияров И.Н., Желтов Ю.В., Забродин Д.П., Зейгман Ю.В., Ибатуллин Р.Р., Ибрагимов Н.Г., Кувшинов В.А., Ленченкова Л.Е., Лысенко В.Д., Мирзаджанзаде А.Х., Муслимов Р.Х., Петраков А. М., Петухов А.В., Позднышев Г.Н., Ребиндер П.А., Рогачев М.К., Рубинштейн Л.И., Русанов А.И., Смирнова Н.А., Собанова О.Б., Стрижнев В.А., Стрижнев К.В., Сургучев М.Л., Телин А.Г., Фукс Г.И., Хавкин А.Я., Швецов И.А., J.W. McBain, W.R. Foster, W.B. Gogarty, L.W. Holm, K. Holmberg, L.W. Lake, K.L. Mittel и многие другие.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что разработка химических составов и технологий их применения, позволяющих интенсифицировать добычу высоковязкой нефти из терригенных коллекторов, слабореагирующих на кислотные обработки, с одновременным ограничением водопритока к скважине,

т.е. имеющих селективные свойства воздействия на продуктивный нефтяной пласт, является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы - повышение эффективности разработки залежей высоковязких нефтей в терригенных коллекторах за счет использования мицеллярных растворов (МР) селективного действия.

Идея диссертационной работы – селективное поведение МР на основе водного раствора анионного, цвиттерионного и неионогенного ПАВ в нефтенасыщенных и водонасыщенных пропластках обеспечивает повышение эффективности разработки терригенных коллекторов нефтяных месторождений.

Задачи исследований

1. Выполнить обзор и анализ существующих технологий интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока к скважине с использованием водных растворов ПАВ;
2. Провести экспериментальные исследования поверхностных и реологических свойств разрабатываемых МР;
3. Установить изменения в реологическом поведении МР при их контакте с минерализованными водами и высоковязкими нефтями;
4. Разработать методику прогноза изменения вязкости МР при их смешении с водами различной минерализации (на примере пластовых вод месторождений юга Самарской области);
5. Выполнить фильтрационные испытания разработанного состава на насыпных моделях керна с различной нефтенасыщенностью;
6. Разработать и обосновать технологию интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока к скважине с применением МР селективного действия;
7. Провести промысловые испытания разработанного состава на терригенных коллекторах месторождений Самарской области и оценить эффективность предлагаемой технологии по результатам опытных испытаний.

Методы решения поставленных задач

При выполнении работы использованы стандартные теоретические, общепринятые и разработанные методы проведения экспериментальных исследований (исследования физико-химических свойств, поверхностных и реологических свойств МР в стандартных условиях; определение размеров мицелл; физическое моделирование процессов фильтрации МР на насыпной модели пористой среды и др.). Обработка результатов экспериментальных данных проводилась с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы

1. Выявлено, что предложенное сочетание анионного, цвиттерионного и неионогенного ПАВ в водном мицеллярном растворе обладает комплексным действием: изменяет смачиваемость терригенных пород, при смешении с нефтью

снижает ее вязкость в 5 раз, уменьшает межфазное натяжение на границе с нефтью в 15 раз и повышает собственную вязкость в 2 раза при контакте с пластовой водой, чем ограничивает ее поступление в скважину.

2. Установлены закономерности изменения поверхностных и реологических свойств МР от концентрации ПАВ и электролитов, а также при смешении МР с минерализованными пластовыми водами и высоковязкими нефтями.

Защищаемые научные положения

1. Применение водного МР на основе смесевых ПАВ (нонилфенол со степенью оксиэтилирования 10, кокоамидопропилбетаин и лаурилсульфат натрия) обеспечивает изменение смачиваемости терригенных пород, улучшает поверхностные и реологические свойства пластовых флюидов.

2. Использование разработанной технологии, основанной на закачке МР в терригенные коллекторы, позволяет селективно изменять реологические свойства пластовых флюидов, что приводит к повышению эффективности добычи высоковязкой нефти и снижению обводненности скважинной продукции.

Практическая значимость

1. Разработан водный МР для одновременной интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока к скважине, а также технология его применения.

2. Разработана методика расчёта изменения вязкости МР при его смешении с высокоминерализованными водами.

3. Проведены промысловые испытания разработанного состава на терригенных коллекторах месторождений Самарской области и оценена эффективность предлагаемой технологии.

4. Материалы диссертационной работы использованы в производственных процессах нефтедобычи при проектировании и выполнении обработок призабойной зоны скважины, в учебном процессе при проведении лекционных, лабораторных и практических занятий для студентов, обучающихся по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Апробация работы

Основные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы и рекомендации работы были представлены на 15 международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях и семинарах, в т.ч. на научно-практической конференции с Международным участием «Нефтегазовый комплекс: Проблемы и инновации» (г. Самара, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Практические аспекты нефтепромысловой химии» (г. Уфа, 2016 г.); X Международном научно-техническом конгрессе студенческого отделения общества инженеров-нефтяников - Society of Petroleum Engineers (г. Москва, 2016 г.); Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых

учёных имени академика М.А. Усова (г. Томск, 2015 г.); Международном симпозиуме 18th European Symposium on Improved Oil Recovery (Дрезден, Германия, 2015 г.); X, XI, XII Международных конференциях «Ашировские чтения» (г. Туапсе, 2013 г., 2014 г., 2015 г.); Региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО "Оренбургнефть" (г. Бузулук, 2015 г.); IV Международной конференции «NANOTECHNOILGAS-2014» (г. Москва, 2014 г.); Межрегиональном научно-практическом семинаре «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2014 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2014 г.); XXV, XXVI Региональных научно-технических конференциях молодых специалистов ОАО «Самаранефтегаз» (г. Отрадный, 2013 г., 2014 г.); Всероссийской конференции-конкурсе студентов выпускного курса (г. Санкт-Петербург, 2013 г).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки России. Выдан патент на изобретение № 2610952.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 124 страницах, включает 13 таблиц и 56 рисунков. Список литературы содержит 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, определены цели, идея и задачи, отражена научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы.

Первая глава. В первой части литературного обзора представлено описание основных характеристик водных растворов ПАВ. Особое внимание уделено процессам самоорганизации и условиям формирования мицеллярных структур, а также влиянию формы и размера мицелл на реологические и поверхностные свойства водных растворов ПАВ различных классов. Показано, что при использовании смесевых ПАВ возможно получение ряда синергетических эффектов в изменении межфазного (МФН) и поверхностного натяжения, критической концентрации мицеллообразования (ККМ), солюбилизирующей активности и реологических свойств водных растворов ПАВ. Установленные закономерности изменения свойств водных растворов ПАВ, в зависимости от их состава, позволяют обеспечить необходимые технологические характеристики реагентам на их основе.

Вторая часть литературного обзора посвящена существующим составам, а также технологиям интенсификации добычи нефти. Анализ теоретических и практических аспектов применения водных растворов смесевых ПАВ в

технологиях интенсификации добычи нефти, показал перспективность их использования, позволил определить области применения и направления совершенствования применяемых составов и технологий на их основе, а также сформулировать основные требования к разрабатываемым МР.

Вторая глава. Вторая глава посвящена обоснованию выбора объектов и методов исследования, а также описанию методик проведения экспериментальных исследований.

Для приготовления МР использованы следующие реагенты: анионный ПАВ - лаурилсульфат натрия по ТУ 6-01-7-89; цвиттерионный ПАВ - кокамидопропилбетаин по ТУ 2480-002-04706205-2004; неионогенный ПАВ - неонол АФ 9-10 по ТУ 2483-077-05766801-98.

В качестве объекта исследований выбраны высокосернистая, высокосмолистая, парафинистая нефть (плотность 920 кг/м^3, вязкость 110 мПа·с, содержание серы 3.4 %, смол 16.1 % и парафинов 4.0 % масс.) и высокоминерализованная пластовая вода (общая минерализация 238.5 г/л, плотность 1158 кг/м^3, вязкость 1.42 мПа·с; содержание ионов кальция – 9.36, магния – 2.94, натрия + калия – 94.5, сульфатов - 0.87 г/л, хлорид ионов – 134,9 г/л).

Определение реологических характеристик МР, нефти и минерализованной воды выполняли на реометре MCR 52 (Anton Paar) в диапазоне скоростей сдвига от 1 до 100 с$^{-1}$. Исследования межфазного натяжения (МФН) выполняли по методу вращающейся капли на видеотензиометре SVT15N (DataPhysics). Ввод капли размером 6,0-6,4 мкл проводился хроматографическим шприцом, замер МФН каждого образца фиксировался при достижении равновесия системы при постоянной скорости вращения и температуре. Исследование распределения мицелл по размерам выполнено с использованием лазерного анализатора размеров частиц Microtrac Nanotrac Ultra. Определение изменения смачиваемости пород при воздействии МР выполняли по следующей методике [Башкирцева Н.Ю. Композиции на основе неионогенных ПАВ для комплексного решения задач повышения нефтеотдачи, подготовки и транспортирования высоковязких нефтей: диссертация доктора технических наук: 02.00.13. – Казань, 2009. - 360 с.].

Поведение состава в пористой среде оценивалось на насыпной модели нефте- и водонасыщенного керна, а также на модели керна с остаточной нефтенасыщенностью. Фракционирование песка выполняли с использованием аналитической просеивающей машины Retsch серии AS 200 (Германия). В процессе фильтрационных испытаний контролировалась температура в кернодержателе, расход реагентов, давление на входе и выходе (противодавление) из кернодержателя.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.

Выбор типа, концентрации и соотношения ПАВ в МР осуществляли путем измерения реологических характеристик при его контакте с минерализованными водами. Серия проведенных экспериментов показала, что максимальная динамическая вязкость МР достигается при следующем соотношении компонентов МР (**табл. 1.**).

Поверхностные свойства МР при выбранном соотношении ПАВ представлены на **рис. 1**. МФН на границе «нефть – пластовая вода» составляет 27 мН/м, а на границе раздела фаз «МР-нефть» снижается до 1,74 мН/м, при этом ККМ составляет 2,2 % масс.

Таблица 1 - Состав и основные физико-химические свойства МР

Наименование компонентов	Содержание, % масс.	Мольное соотношение
Анионный ПАВ - лаурилсульфат натрия	1,71	2,27
Цвиттерионный ПАВ - кокоамидопропилбетаин	5,61[1]	1
Неионогенный ПАВ - Неонол АФ9-10	8,86	2,36
Пресная вода	Остальное	
Общая концентрация ПАВ, %	16,2	
Вязкость состава, мПа·с (при 40 $с^{-1}$)	70,4	
Плотность состава, кг/$м^3$	1010	

Примечание: [1] – при содержании активного вещества 45 % масс.

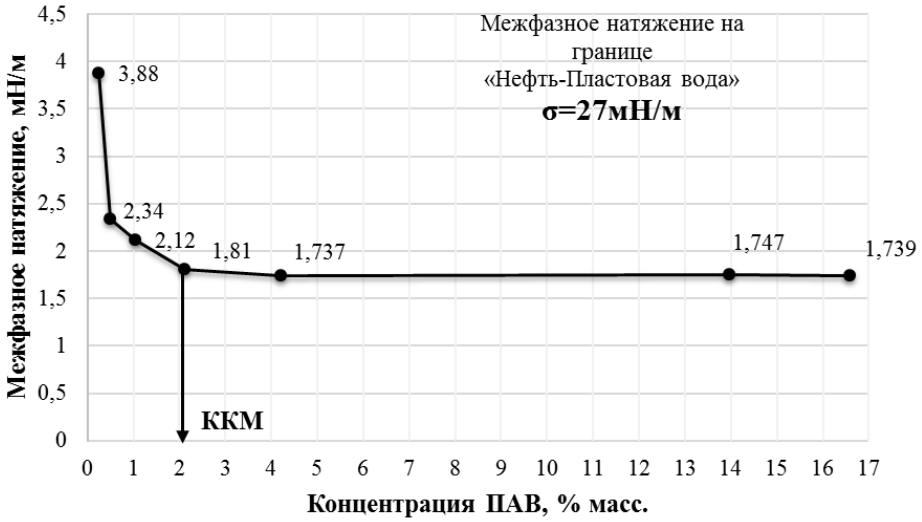


Рисунок 1 – Изменение межфазного натяжения на границе «МР – нефть» от общей концентрации ПАВ

Зависимость вязкости МР от общей концентрации ПАВ представлена на **рис. 2**. Увеличение общей концентрации ПАВ до 14-16 % масс. приводит к плавному повышению вязкости раствора, для данного участка характерен рост количества сферических мицелл в объеме раствора (согласно теории А. Эйнштейна), дальнейшее добавление ПАВ приводит к кратному изменению динамической вязкости за счет прохождения ряда равновесных состояний, характеризуемых

изменением числе агрегации, размера и формы мицелл, при этом вязкость раствора достигает 220 мПа·с при общем содержании ПАВ 18,5%.

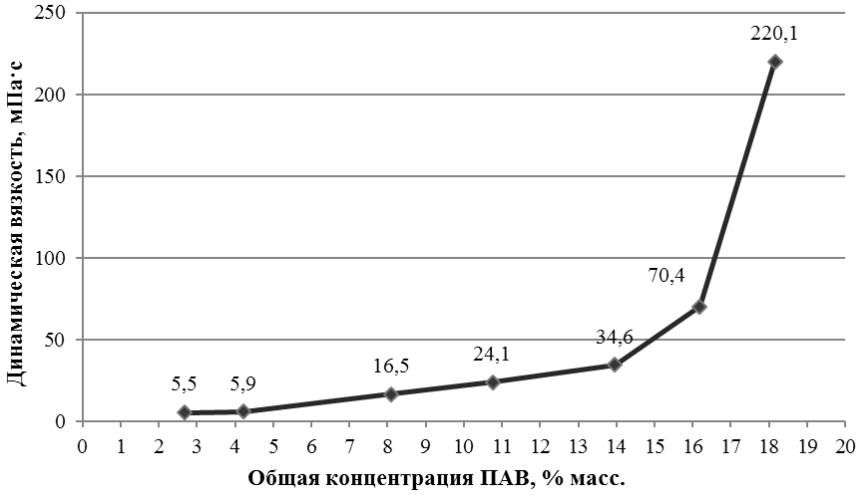
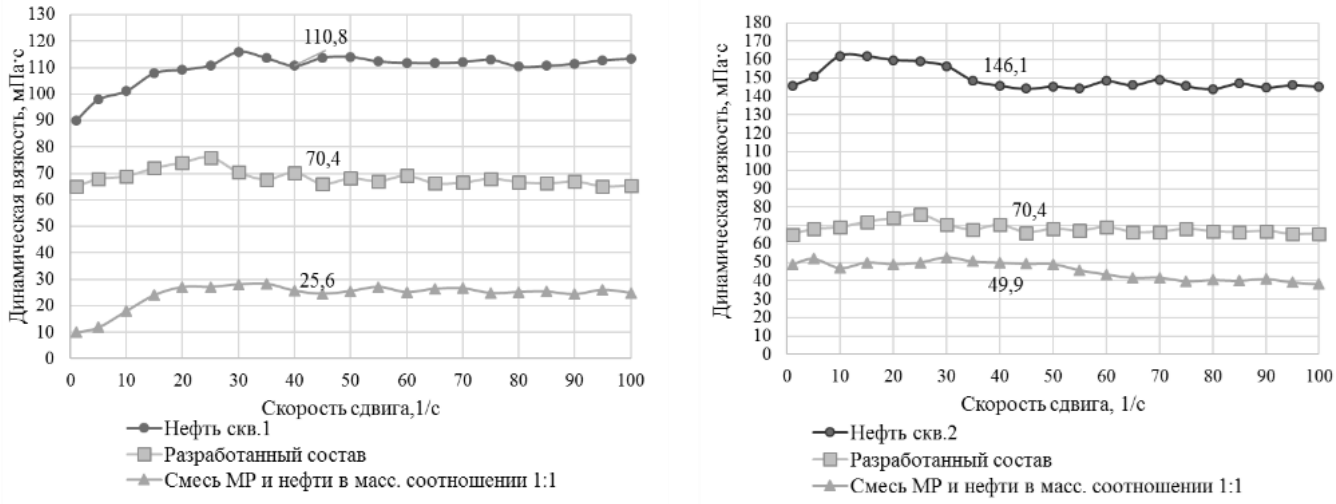


Рисунок 2 – Зависимость динамической вязкости МР от общей концентрации ПАВ

Для дальнейших экспериментальных исследований выбран состав МР с общей концентрацией ПАВ 16,0 % масс. Повышение содержания ПАВ в МР выше указанного значения приводит к ухудшению реологических характеристик при его смешении с минерализованной водой, влияет на стоимость реагента и затрудняет его закачку в призабойную зону скважины.

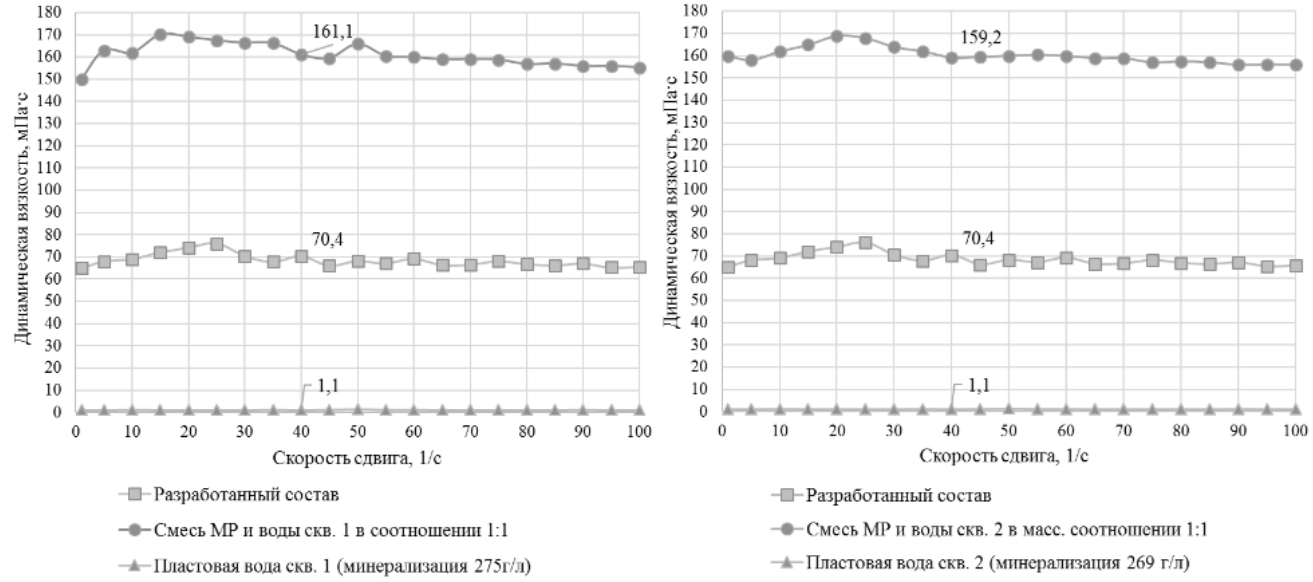
Выполненные реологические исследования показали, что исходная динамическая вязкость МР составляет 70,4мПа·с при 40 $с^{-1}$.

При смешении МР с нефтью в массовом соотношении 1:1 вязкость смеси снижается в 3-4 раза (**рис. 3**)., а при контакте раствора с пластовой минерализованной водой вязкость смеси возрастает до 159 – 160 мПа·с при 40 $с^{-1}$ (**рис. 4**).



а) *б)*

Рисунок 3 – Зависимость динамической вязкости МР, нефти (скв. 1 (а) и 2 (б)) и смеси нефти с МР в массовом соотношении 1:1 от скорости сдвига



а) *б)*

Рисунок 4 – Зависимости динамической вязкости МР и смеси пластовой воды (скв. 1 (а) и скв. 2(б)) и МР в массовом соотношении 1:1 от скорости сдвига

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что применение водного МР на основе смесевых ПАВ (нонилфенол со степенью оксиэтилирования 10, кокоамидопропилбетаин и лаурилсульфат натрия) обеспечивает селективное изменение реологических свойств пластовых флюидов во всем диапазоне исследованных скоростей сдвига: при смешении МР (в указанном соотношении и общей концентрации ПАВ) с высоковязкой нефтью динамическая вязкость смеси снижается, а при контакте МР с высокоминерализованной пластовой водой повышается.

С целью установления влияния компонентного состава пластовой воды на реологические характеристики МР были приготовлены модельные воды с известной концентрацией одновалентных (Na^+ и K^+) и двухвалентных катионов (Ca^{2+} и Mg^{2+}). Изменение динамической вязкости смеси «МР-модельная вода» от ионной силы раствора представлено на **рис. 5**. Как следует из представленных данных, повышение концентрации электролитов приводит к увеличению динамической вязкости смеси, причем влияние одновалентных электролитов является определяющим.

Определение размера мицелл в МР при изменении концентрации электролита, выполненное с использованием анализатора размеров частиц, показало, что исходная смесь анионного и неионного ПАВ (в равном мольном отношении) образует сферические мицеллы со средним размером 1.9 нм (95% мицелл с размерами от 1,34 до 2,69 нм), добавление цвиттерионного ПАВ в МР увеличивает средний размер мицелл, который достигает 5.5 нм, причем более 80 % имеют размеры от 3.8 до 7.6 нм.

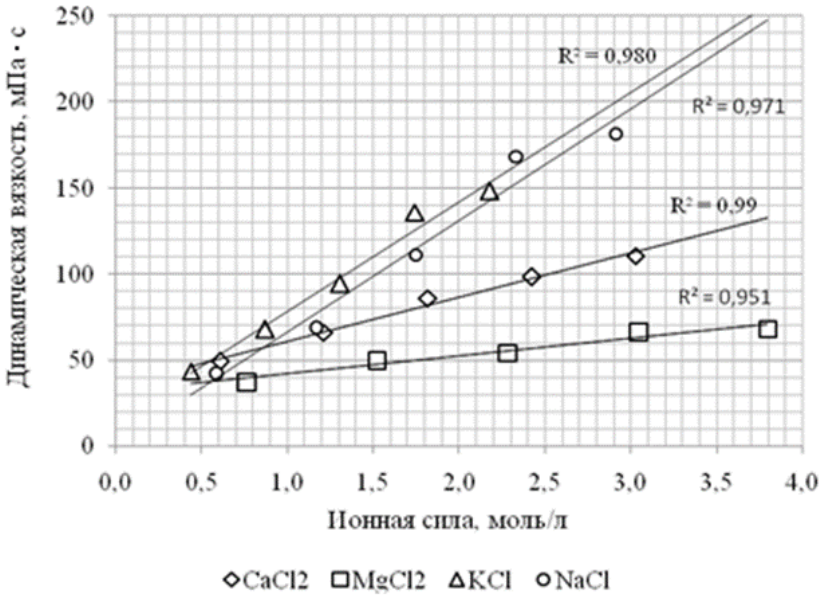


Рисунок 5 – Зависимость динамической вязкости МР от ионной силы модельной пластовой воды

При контакте МР с минерализованной водой происходит образование мицелл с более широким распределением по размерам (более 97% имеют размеры от 7,6 до 22 нм) и средним размером мицеллы 12,7 нм (**рис. 6**). Влияние концентрации одновалентных катионов на размеры мицелл представлено на **рис. 7**. Наблюдается четкая зависимость изменения размера мицелл от концентрации электролита, которая приводит к двукратному повышению среднего размера мицелл в растворе.

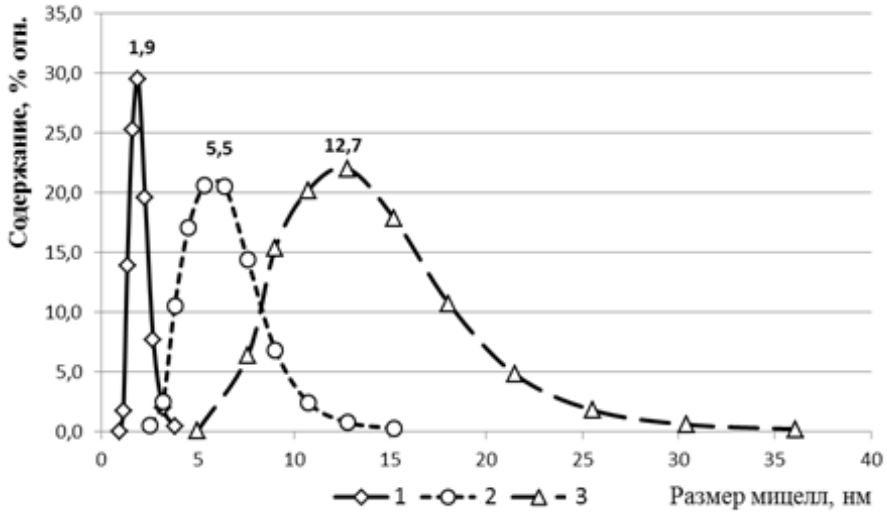


Рисунок 6 – Изменение размера мицелл (1 – смесь анионного и неионного ПАВ; 2 - МР; 3 –смесь МР и минерализованной воды при массовом соотношении 1:1)

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что повышение вязкости состава в присутствии электролитов (высокоминерализованной воды) связано с изменением размера и формы мицелл, а также снижением заряда на поверхности мицеллы в присутствии противоионов.

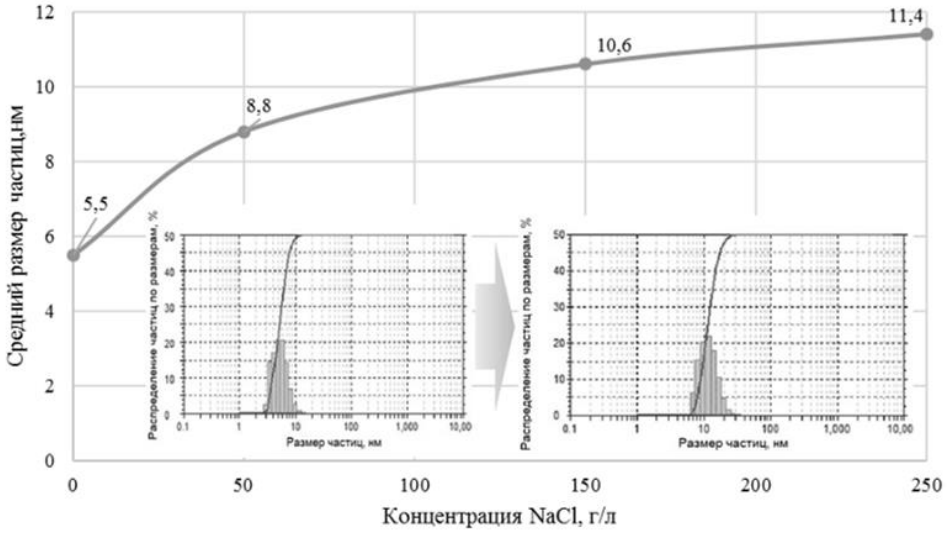


Рисунок 7 – Зависимость размера мицелл в МР от концентрации катионов натрия

Достижение высоких значений вязкости при взаимодействии с минерализованными водами является основой как для разработки оптимального состава МР, так и для обоснования выбора объектов испытаний.

С целью быстрой оценки эффективности МР для различных объектов испытаний была разработана методика (эмпирическая зависимость) прогноза изменения динамической вязкости МР при его контакте с минерализованной водой.

Для построения зависимости использованы методы регрессионного анализа, которые позволяют исследовать взаимосвязь между различными переменными в исходных данных, при этом исследуемой переменной являлась динамическая вязкость смеси «МР – высокоминерализованная вода» при равном массовом соотношении, а независимыми переменными были значения шестикомпонентного состава пластовых вод. Для построения модели использованы данные по компонентному составу пластовых вод 30 месторождений юга Самарской области с общей минерализацией от 159 до 252 г/л.

Для построения зависимости использовалась полиномиальная регрессия с порядком полинома равным три, так как в процессе анализа было показано, что при использовании полиноминальных зависимостей более высокого порядка коэффициенты при членах полинома больших степеней близки к нулю. Определение коэффициентов модели выполнено с использованием метода наименьших квадратов. Высокие значения коэффициентов приводили к большой погрешности при перекрестной проверке, что привело к необходимости использования метода *L1* регуляризации с коэффициентом регуляризации равным 0,12. Символьное соответствие переменных эмпирической зависимости представлены в **табл. 2**.

Таблица 2 – Символьное соответствие переменных эмпирической зависимости

Символьное соответствие переменных					
HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+ и K^+
a	b	c	d	e	f

В результате определена эмпирическая зависимость изменения динамической вязкости МР в смеси с пластовой водой различной минерализации (при равных массовых соотношениях), которая имеет следующий вид:

$$y=160.3849+11.29534\cdot b+1.518251\cdot d+92.04625\cdot ab+0.09456598\cdot df-$$
$$-1054.994\cdot a^3-6.269985\cdot a^2d+38.15567\cdot ab^2+40.54556\cdot abe-5.463194\cdot b^2d-$$
$$-0.689847\cdot bd^2-0.082319\cdot bde-0.733938\cdot be^2+0.016158\cdot d^2e+0.0692214\cdot e^3-$$
$$0.001062\cdot ef^2$$

Оценка работоспособности модели по результатам тестирования показала, что средняя относительная погрешность составила 2.4%.

Определение смачивающего действия МР оценивали по поднятию жидкости в пористой среде. Для экспериментов использовали фракцию 106-150 мкм терригенной породы двух типов: активированную и неактивированную. В качестве смачивающих жидкостей использовали – пресную воду и керосин. Активация заключалась в кипячении терригенной породы в концентрированной соляной кислоте в течение 2 часов для удаления естественных гидрофобных примесей (окислов и гидроокислов железа, частичек глины и т.п.), промывании водой и сушке. Использование в экспериментах неактивированной породы моделировало естественную горную породу-коллектор, а активированной - идеализированный вариант гидрофильной породы. Для определения смачивающего действия в терригенную породу добавляли заранее приготовленный мицеллярный раствор и помещали в сушильный шкаф до полного высыхания. Обработанную и высушенную породу помещали в две стеклянные трубочки, на нижнем конце которых установлены сетки-башмачки, и производили погружение концов стеклянных трубочек, по которым оценивался уровень поднятия смачивающей жидкости по пористой среде активированной и неактивированной терригенной породы, обработанной мицеллярным раствором. Результаты исследований показали, что обработка МР терригенной породы приводит к изменению смачиваемости породы – наблюдается повышение смачиваемости породы по углеводородам на 23% (неактивированная порода) и на 30% (активированная) относительно ее смачиваемости по пресной воде.

На следующем этапе работы проведены фильтрационные испытания МР на насыпных моделях керна. В кернодержатель помещали предварительно размолотую, вымытую и высушенную естественную породу рассматриваемого объекта с размером частиц 106-150 мкм. Делители фаз заполняли нефтью, пластовой водой и разработанным составом (МР). Кернодержатель, представляющий из себя термостатируемую прозрачную трубку с внутренним диаметром 23 мм и длиной 230 мм, забивали предварительно вымытой и

высушенной терригенной породой с размером частиц 106-150 мкм. Делители фаз заполняли нефтью, пластовой водой и разработанным МР. Подача реагента с расходом 3 мл/мин обеспечивалась насосом высокого давления. Контроль давления на входе и выходе из кернодержателя обеспечивали электронные датчики давления. Противодавление на выходе из керна устанавливалось постоянным и составляло 0,5 МПа. Объем пор кернодержателя – 49,5 см^3. Температура в кернодержателе составляла 23°С и соответствовала пластовой. Фильтрацию МР проводили на нефте-, водонасыщенном и промытом керне (подготовленный керны насыщали пластовой минерализованной водой, определяли объем пор, далее керн насыщали нефтью и закачиваемой водой до полной обводнённости выходящей из керна жидкости, во всех режимах испытаний при насыщении пластовыми флюидами контролировали достижение стационарных условий фильтрации. Результаты фильтрационных испытаний МР представлены на **рис. 8.**

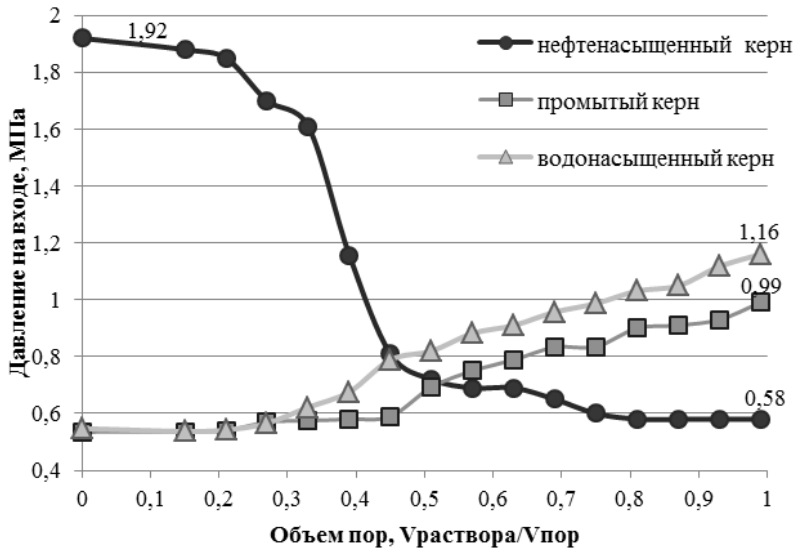


Рисунок 8 – Зависимость давления на входе от объема прокаченного МР в нефтенасыщенный, промытый и водонасыщенный керн, выраженная в долях порового объема кернодержателя

При подаче состава в нефтенасыщенный кернодержатель происходит снижение давления с 1,92 МПа до 0,58 МПа, причем скачкообразное падение давления наблюдается при подаче состава в диапазоне от 0,2 до 0,45 порового объема, далее давление снижается плавно. Снижение давления и улучшение фильтрации нефти в пористой среде происходит за счет снижения вязкости нефти и изменении смачиваемости породы. Введение ПАВ способствует изменению молекулярной подвижности групповых компонентов нефтяных дисперсных систем и структурно-механических свойств нефти, улучшая ее реологические и фильтрационные свойства.

Поведение состава в водонасыщенной модели пласта отличается от нефтенасыщенной. При прохождении 0,2 объема пор МР наблюдается плавное повышение давления до 1,16 МПа, связанное с повышением вязкости МР при контакте с пластовой водой. Сходная динамика изменения давления наблюдается при насыщении промытого керна МР, давление повышается до 0,99 МПа при прокачке одного порового объема МР. В данном случае более низкое давление

связано с наличием в «промытом» керне остаточной нефти, которая ограничивает рост вязкости, изменяя строение мицелл за счет процесса солюбилизации нефти.

Результаты экспериментальных исследований показали, что сочетание анионного, неионного и цвиттерионного ПАВ позволяет создать водные растворы, обладающие селективным и комплексным действием. Предложенный МР при обработке нефтенасыщенных пропластков призабойной зоны пласта (ПЗП) позволяет уменьшить вязкость нефти, снизить межфазное натяжение на границе «нефть - состав» и улучшить ее фильтрационные свойства, что приводит к повышению коэффициента продуктивности и дебита скважины. При взаимодействии МР с пластовой водой происходит рост вязкости состава и формируется экран в водонасыщенных пропластках. Образованный экран изменяет фильтрационные потоки в призабойной зоне пласта, перераспределяя состав в нефтенасыщенные пропластки. Таким образом, при воздействии МР на призабойную зону обводненного нефтяного пласта обеспечивается выравнивание профиля притока, стимулируется приток нефти из нефтенасыщенных и ограничивается водоприток из водонасыщенных пропластков.

В ***четвертой главе*** работы представлено описание опытно-промысловых испытаний разработанного МР и технологии его закачки.

Для проведения опытно-промысловых испытаний было выбрано три скважины. Краткая характеристика объектов представлена в **табл. 3.**

Таблица 3 – Характеристики объектов

Характеристики объекта	Объект 1	Объект 2	
	Скв.1	Скв.2	Скв.3
Пласт	Б2		
Тип коллектора	Терригенный		
Перфорированная мощность пласта, м	7	5	2,5
Проницаемость, мкм^2	1,979	2,64	
Пористость, д.ед.	0,21	0,23	
Пластовая температура, °С	31	31	30
Вязкость в пластовых условиях, мПа·сек	30,5	62,67	63,8
Коэффициент расчленённости, ед	2	1,4	
Минерализация пластовой воды, г/л	230,6 - 268,4	241,3-258,4	
Причины высокой обводненности	*Образование конуса подошвенной воды*		

Параметры работы скважин до и после геолого-технологического мероприятия, а также планируемые параметры представлены в **табл. 4**.

Таблица 4 – Параметры работы скважин

Показатели	Скв. №1 Объект 1			Скв. №2 Объект 2			Скв. №3 Объект 2		
	До ГТМ	План	После ГТМ	До ГТМ	План	После ГТМ	До ГТМ	План	После ГТМ
Дебит жидкости, $м^3$/сут	97	101	106	166	125	172	127	132	177
Дебит нефти, т/сут	5,06	9,6	10,78	4,1	9,29	4,68	5,07	8,98	9,63
Обвод., %	94,2	89	88,7	97,3	92	97,0	95,6	93	94
Насос	ЭЦН 5-125-1200	ЭЦН 5-125-1200	ЭЦН 5-125-1200	ЭЦН 5-125-550	ЭЦН 5-125-650	ЭЦН 5-125-650	ЭЦН5-80-1550	ЭЦН5-125-1250	ЭЦН5-125-1250

На скважине выполнена закачка 7$м^3$ раствора, из расчета 1$м^3$ состава на 1м перфорации. Запускной прирост по нефти равен 5,9 т/сут (+ 0,8 т/сут от запланированного значения), а обводненность при запуске составила 88,7% (-5,3% от запланированного значения). В результате проведения обработки призабойной зоны МР с момента вывода скважины №1 Объекта 1 на режим и за последующие 60 суток работы дополнительная добыча нефти составила 196 тонн нефти. Параметры работы скважины 1 Объекта 1 представлены на рис. 9.

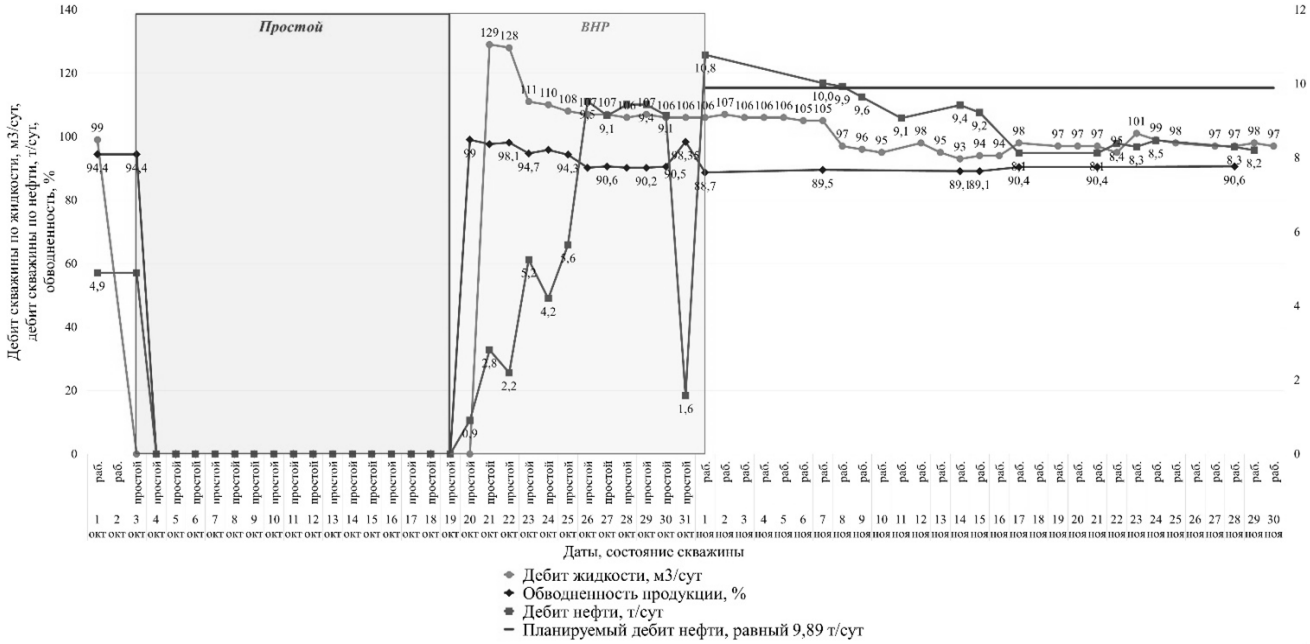


Рисунок 9 – Параметры работы скважины 1 объекта 1 до и после обработки призабойной зоны МР

По **Объекту 2** была выбрана **скважина №2.** После обработки скважины мицеллярным раствором запускной прирост по нефти равен 0,6 т/сут (-4,6 т/сут от запланированного значения), а обводненность при запуске составила 97,0% (-0,3%). Следует отметить, в связи с низкой температурой окружающей среды, равной минус 3˚С, при приготовлении раствора для закачки неионогенный ПАВ застыл и для его прогрева была использована паровая передвижная установка.

Таким образом, обработка паром неионогенного ПАВ, снижение общей концентрации ПАВ и изменения соотношения привело к снижению эффективности технологии. В результате проведения обработки призабойной зоны мицеллярным раствором с момента вывода скважины №1 Объекта 2 на режим и за последующие 50 суток работы дополнительная добыча нефти составила 49 тонн нефти.

На **скважине №3 Объекта 2** была выполнена закачка раствора в количестве 3 $м^3$, из расчета 1,2 $м^3$ состава на 1м перфорированной толщины. Запускной прирост по нефти равен 5,8 т/сут (+ 0,7 т/сут от запланированного значения), а обводненность при запуске составила 94,0% (-2,6%). Но через 6 дней успешной работы произошел прорыв экрана по причине повышения отбора жидкости (запланированный - 132 $м^3$/сут, реальный – 177 $м^3$/сут) и малого объема закаченного МР, что привело к отсутствию дополнительной добычи.

Результаты опытно-промысловых испытаний показали, что использование разработанной технологии, основанной на закачке водных МР в призабойную зону скважины терригенных пластов, является перспективной и позволяет интенсифицировать добычу высоковязкой нефти и ограничить водоприток к скважине.

В работе также выполнена оценка экономического эффекта от внедрения мероприятия на скважине 1 объекта 1. На 22.08.2017 года дополнительная добыча нефти составила 343 тонны. Расчет выполнен при цене нефти на внешнем рынке 50 долларов за баррель. Цена реализации за вычетом экспортной пошлины составила 15 627,7 руб./т. Ставка НДПИ принята 7975 руб./т. Инвестиции в себестоимости составили 1,734 млн. руб. Дисконтированный чистый денежный поток (NPV) составил 0,66 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ существующих технологий интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока к скважинам с использованием водных растворов поверхностно-активных веществ, показал перспективность использования смесевых ПАВ, позволил определить области применения и направления совершенствования применяемых технологий, а также сформулировать основные требования к разрабатываемым МР.
2. Проведены экспериментальные исследования поверхностных и реологических свойств МР различного химического состава.
3. Разработан водный МР на основе смеси анионного, неионного и цвиттерионного ПАВ, который обеспечивает селективное изменение реологических характеристик пластовых флюидов при их контакте с МР.

4. На основании результатов лабораторных исследований разработана методика прогноза изменения вязкости МР при их смешении с водами различной минерализации (на примере пластовых вод месторождений юга Самарской области);

5. Результаты исследований показали, что разработанный МР обладает комплексным действием:

- способен изменять смачиваемость терригенных пород;
- обеспечивает образование в водонасыщенной пористой среде водоизоляционного экрана;
- улучшает реологические свойства высоковязкой нефти.

6. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технология применения МР селективного действия с целью интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока к скважине.

7. Результаты опытно-промысловых испытаний показали, что использование разработанной технологии, основанной на закачке водных МР в призабойную зону скважины терригенных пластов, является перспективной и позволяет интенсифицировать добычу высоковязкой нефти и ограничить водоприток к скважине.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, В КОТОРЫХ ОСВЕЩЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Из перечня научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки:

1. Бабицкая, К.И. Исследование влияния размера мицелл на эффективность вытеснения остаточной нефти / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, Т.В. Чихерева // Известие Вузов. Нефть и газ, Тюмень. - 2015. - №5.- С. 36-40.

2. Бабицкая, К.И. Мицеллярный раствор селективного действия для интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, И.В. Царьков // Научно-технический журнал «Нефтепромысловое дело». - 2016. - № 8. - С. 31-34.

3. Бабицкая, К.И. Прогнозирование изменения вязкости мицеллярного раствора селективного действия при смешении с пластовыми водами различной минерализации / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, И.В. Царьков, П.В. Ротерс, Т.В. Чихерева // Научно-технический журнал «Технологии нефти и газа». 2017. - № 1. - С. 27-32.

4. Бабицкая, К.И. Применение водных нефтевытесняющих составов на основе кислого гудрона для повышения КИН / К.И. Бабицкая, В.П. Городнов, В.В. Коновалов, И.В. Царьков, А.А. Ковалев// Журнал «Вестник ЦКР Роснедра», Москва. 2013. - №5. - С. 21-25.

5. Babitskaya, K.I. Generalized analysis of the field test results of the micellar-polymer flooding method / K.I. Babitskaya, V.V. Konovalov, V.P. Gorodnov, I.V. Tsarkov // Научно-технический журнал «Ciencia e tecnica.vitivinicola», Португалия, 2014. - №11 - С. 183-193.

Патент

6. Бабицкая К.И., Склюев П.В., Коновалов В.В., Царьков И.В., Жидкова М.В. Мицеллярный раствор для извлечения нефти: пат. 2610952 Рос. Федерация. E21B 43/22, заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «СамГТУ». – №2015124836; заявл. 25.06.2015 г.; опубл. 17.02.2017 г.

Прочие печатные издания

7. Бабицкая, К.И. Сравнительная оценка эффективности применения мицеллярных растворов для повышения нефтеизвлечения на месторождениях высоковязких нефтей / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, Л.Н. Хромых, Д.В. Айметова// Труды X Международной научно-практической конференции Ашировские чтения, СамГТУ. - 2013. - С.287-290.

8. Бабицкая, К.И. Экспериментальная оценка эффективности применения нефтевытесняющих составов в повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой нефти / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, Д.В. Айметова // XXXX Самарская областная Студенческая научная конференция, Самара: СамГТУ. - 2014. – С. 274.

9. Бабицкая, К.И. Экспериментальные исследования нефтевытесняющей эффективности мицеллярно-полимерных растворов на месторождениях высоковязких нефтей / К.И. Бабицкая, Д.В. Айметова, В.Е. Долинюк, В.В. Коновалов, В.П. Городнов // Материалы международного материала «Рассохинские чтения» - Ухта, УГТУ. – 2014. - С.106-112.

10. Бабицкая, К.И. Экспериментальная оценка эффективности применения нефтевытесняющих составов в повышении нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой нефти / К.И. Бабицкая, Д.В. Айметова, В.Е. Долинюк, В.В. Коновалов // Сборник тезисов 10-й всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2014. - С.45.

11. Бабицкая, К.И. Обобщенный анализ результатов опытно-промысловых испытаний метода мицеллярно-полимерного заводнения/ К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, В.П. Городнов, И.В. Царьков // Труды XI Международной научно-практической конференции Ашировские чтения. - 2014. - С.217-226.

12. Бабицкая, К.И. Исследование влияния размера и формы мицелл на эффективность нефтевытеснения при мицеллярно-полимерном заводнении / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, А.М. Штеренберг, К.А. Овчинников // Материалы IV Международной конференции «NANOTECHNOILGAS-2014». Москва, РГУ им. И.М. Губкина. - С.264-265.

13. Бабицкая, К.И. Исследование эффективности нефтевытесняющих композиций на основе промежуточного продукта производства сульфонатных присадок / К.И. Бабицкая, В.В. Коновалов, В.П. Городнов // Труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Том 2. Томск. - 2015. - С.50-52.

14. Бабицкая, К.И. Мицеллярные растворы селективного действия для интенсификации добычи высоковязкой нефти и ограничения водопритока из терригенных коллекторов / К.И. Бабицкая, И.А. Левин, Т.В. Чихерева // Сборник научных трудов X Международного научно-технического конгресса Студенческого отделения общества инженеров-нефтяников - Society of Petroleum Engineers (SPE). Москва. - 2016. - С.34-35.