

*На правах рукописи*



**Шайхразиева Ляйсан Равилевна**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ  
ПАВ-ПОЛИМЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ДЛЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ  
(НА ПРИМЕРЕ ВИШНЕВО-ПОЛЯНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

Специальность 25.00.17 –

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Бугульма – 2019

Работа выполнена в государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт» (ГБОУ ВО АГНИ)

**Научный руководитель:** **Хисамов Раис Салихович**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Мухаметшин Вячеслав Шарифуллович**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», заведующий кафедрой «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений»

**Бабицкая Ксения Игоревна**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», старший преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

**Ведущая организация:** Общество с ограниченной ответственностью «Тюменский нефтяной научный центр» (ООО «ТННЦ»)

Защита диссертации состоится «19» декабря 2019 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 222.018.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина по адресу: 423236, Республика Татарстан, г.Бугульма, ул. М.Джалиля, д.32.

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Ирина Вячеславовна Львова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования:**

В настоящее время в структуре запасов нефти Республики Татарстан увеличивается доля трудноизвлекаемых запасов: в заводненных или слабопроницаемых терригенных коллекторах, в водонефтяных зонах, высоковязких и тяжелых нефтей.

Несмотря на большое количество работ по разработке технологий, направленных на повышение выработки трудноизвлекаемых запасов нефти, актуальным направлением исследований является разработка адресных технологий, основанных на более широком изучении параметров пластовой системы.

Для добычи трудноизвлекаемых запасов высоковязкой нефти был разработан ряд технологий, основанных на тепловом и физико-химическом воздействии. На основе ранее проведенных исследований по оценке влияния теплового воздействия на реологические характеристики высоковязкой нефти месторождений Республики Татарстан и Казахстана установлено, что применение теплового метода воздействия может привести к ухудшению структурно-механических свойств нефти. Поэтому вопросы совершенствования разработки технологии физико-химического воздействия являются актуальной задачей.

Экспериментальные исследования по разработке новых технологий ПАВ-полимерного воздействия для высоковязких нефтей, как правило, основаны на изучении изменения параметров растворов в условиях, определенных как средние значения основных физико-химических и геолого-технических характеристик объекта исследования. Однако проблема обоснования технологий воздействия с учетом локальных, частных значений геолого-физических характеристик и их изменчивости в пределах объекта требует увеличения сложности и методического разнообразия при проведении лабораторных исследований.

Проведение и анализ экспериментальных исследований с целью определения изменчивости по расширенному перечню геолого-физических характеристик объекта и разработка на этой основе составов композиций является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования:**

Вопросами изучения проблем повышения выработки трудноизвлекаемых запасов нефти, а также разработкой технологий увеличения нефтеизвлечения высоковязкой нефти, в том числе в условиях карбонатных коллекторов, занимались отечественные и зарубежные ученые: Алтунина Л.К., Андреев В.Е., Бакиров И.М., Ганеева Ю.М., Гильманова Р.Х., Глумов И.Ф., Дубинский Г.С., Жданов С.А., Закиров С.Н., Зарипов А.Т., Зейгман Ю.В., Ибатуллин Р.Р., Кадыров Р.Р., Каневская Р.Д., Котенев Ю.А., Лорье Л. Шрамм, Магадова Л.А., Михайлов Н.Н., Мищенко И.Т., Мусабилов М.Х., Муслимов Р.Х., Мухаметшин В.Ш., Рогачев М.К., Романов Г.В., Султанов Ш.Х., Сургучев М.Л., Хисамов Р.С., Хисамутдинов Н.И., Юсупова Т.Н.

### **Цель диссертационной работы:**

Увеличение эффективности вытеснения высоковязкой нефти на основе экспериментальных исследований по обоснованию применения адресных ПАВ-полимерных композиций.

### **Объект исследования:**

Объектом исследования является бобриковско-радаевский горизонт Вишнево-Полянского месторождения.

### **Основные задачи исследования:**

1. Охарактеризовать макро- и микронеоднородность коллектора бобриковско-радаевского горизонта Вишнево-Полянского месторождения.
2. Изучить геохимические характеристики нефти Вишнево-Полянского месторождения и определить их неоднородность в пределах объекта исследования.
3. На основе реологических исследований нефти определить возможность применения в условиях объекта исследования физико-химических методов воздействия.
4. Разработать методики и провести лабораторные исследования ПАВ и ПАВ-полимерных композиций, с учетом их влияния на коллоидную устойчивость нефти и вязкоупругие свойства композиций.
5. Оценить возможность применения разработанных ПАВ-полимерных композиций на основе определения коэффициента вытеснения нефти по результатам фильтрационных исследований.

### **Научная новизна работы:**

1. На основе результатов томографических исследований структуры порового пространства образцов керна объекта установлена высокая микронеоднородность коллектора (коэффициент вариации распределения радиуса пор по размерам составляет 0,39-0,59).
2. На основе хроматографических исследований показана высокая неоднородность высоковязкой нефти по концентрации высокомолекулярных компонентов  $C_{21}-C_{40}$  (коэффициент вариации до 1,36) и существенно меньшая концентрация, по сравнению со слабоизменёнными нефтями, лёгких гомологов. На основе реологических исследований установлена высокая вариабельность структурно-механических свойств нефти (коэффициент вариации от 0,76 до 1,20) и определена устойчивость структурных образований нефти к внешнему сдвиговому и термическому воздействию.
3. Установленная кинетика снижения поверхностного натяжения (от 3,76 до 1,89 мН/м для неионогенного ПАВ в минерализованной воде, от 1,61 до 1,25 мН/м для катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде) в диапазоне концентраций ПАВ от 0,1 до 0,4% показала существенное влияние на данный процесс не только типа ПАВ, но и свойств нефти. Диапазон изменения межфазного натяжения, который обеспечивается идентичным раствором ПАВ определенной концентрации, отличается в 1,5-2 раза. Выполненные комплексные исследования динамики межфазного натяжения, адсорбции различных составов ПАВ позволили научно обосновать комплексный параметр для экспресс-оценки ПАВ с целью повышения нефтеизвлечения в условиях конкретного объекта внедрения.
4. На основе комплекса экспериментальных исследований установлено, что добавление к раствору биополимера катионсодержащего комплексного ПАВ концентрацией 0,4% и бактерицида 0,1% в интервале скорости сдвига от 0 до 100  $s^{-1}$  обеспечивает сохранение вязкоупругих свойств композиции в диапазоне температур 20-30 °С.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. На основании томографических исследований экспериментально показан характер микронеоднородности коллектора (радиусы пор коллектора от 10 до 700 мкм), на основе хроматографических исследований установлена неоднородность высоковязкой нефти по содержанию высокомолекулярных компонентов  $C_{21}-C_{40}$  (коэффициент вариации до 1,36), что позволило обосновать применение ПАВ-полимерных композиций в условиях Вишнево-Полянского месторождения.

2. В соавторстве разработаны методики и проведены экспериментальные исследования, на основании которых разработаны составы ПАВ-полимерных композиций, которые рекомендованы для опытно-промышленных испытаний в условиях Вишнево-Полянского месторождения.

3. Для сравнительной экспресс-оценки возможности применения ПАВ в условиях объекта (свойств нефти и типа коллектора) предложен комплексный параметр ( $K$ ), характеризующий удельное снижение концентрации ПАВ в растворе вследствие адсорбции на поверхности дезинтегрированного керна на единицу снижения поверхностного натяжения в заданном диапазоне увеличения концентраций. Для Вишнево-Полянского месторождения рассчитано значение параметра  $K$ , которое для неионогенного ПАВ составляет 5,5, для катионсодержащего комплексного ПАВ – 1,1.

4. Предложен первичный скрининг условий применимости разработанных ПАВ-полимерных композиций для использования при проектировании разработки месторождений, характеризующихся схожими условиями.

5. Результаты экспериментальных исследований были использованы при составлении программы исследовательских испытаний технологического процесса применения ПАВ-полимерных композиций по проекту «Создание комплекса технологических решений для увеличения нефтеотдачи пластов, содержащих высоковязкую нефть» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по Соглашению о предоставлении субсидии №14.610.21.0019 от 23.10.17 (уникальный идентификатор работ RFMEFI61017X0019).

#### **Методы исследований и решения задач:**

Решение поставленных задач основано на результатах обобщения теоретических и экспериментальных исследований. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием методов математической статистики.

#### **Основные защищаемые положения:**

1. Результаты экспериментальных работ по определению характера неоднородности исследуемого объекта как по макро- и микронеоднородности и изменчивости порового пространства, так и по составу и свойствам добываемой высоковязкой нефти.

2. Результаты тензиометрических и оптических исследований ПАВ по обоснованию их применения в составе ПАВ-полимерных композиций.

3. Составы ПАВ-полимерных композиций для повышения коэффициента вытеснения трудноизвлекаемых запасов высоковязкой нефти в условиях объекта исследования.

**Степень достоверности результатов работы** подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными на современном лабораторном оборудовании, сходимостью расчетных параметров и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и ученых «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (Нижевартовск, 2017г.), на Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» в рамках Международного форума «Наука и Инновации» (Альметьевск, 2018г.), 73-ей Международной молодежной научной конференции «Нефть и

газ»-2019 (Москва, 2019г.), XVII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля (Санкт-Петербург, 2019г.), Региональной студенческой научно-практической конференции «Молодые нефтяники» (Альметьевск, 2019г.).

**Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки Российской Федерации.

**Личный вклад автора:**

Заключается в постановке цели и задач теоретических и экспериментальных исследований, формулировке научных положений, непосредственном участии в проведении экспериментов, анализе и обобщении полученных результатов, разработке методик и обосновании комплексных составов для повышения эффективности добычи трудноизвлекаемых запасов.

**Структура и объем диссертационной работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 177 наименований, и 4 приложений. Материал диссертации изложен на 160 страницах и содержит 39 таблиц, 13 формул и 92 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность исследования, определены цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость работы, основные защищаемые положения.

**В первой главе** рассмотрены проблемы добычи трудноизвлекаемых запасов нефти, основными из которых являются:

- наличие высокой неоднородности, характерной для нефтенасыщенных пластов;
- аномальная вязкость нефти, которая зависит от концентрации в ней газообразных, жидких и твердых веществ (механических примесей или высокомолекулярных веществ – смолистоасфальтеновых веществ (САВ), парафинов, органических ПАВ и металлопорфириновых комплексов) и от степени дисперсности твердых частиц;
- факторы, влияющие на формирование остаточной нефти и вовлечение ее в процесс разработки.

Проанализированы основные физико-химические методы нефтеизвлечения трудноизвлекаемых запасов нефти, в том числе и для месторождений высоковязких нефтей: потокоотклоняющие технологии, полимерное воздействие, закачка растворителя, растворов ПАВ, щелочи и комбинированное воздействие.

Обзор научно-технической литературы позволил определить актуальные направления выработки трудноизвлекаемых запасов нефти, наиболее перспективными из которых для месторождений высоковязкой нефти являются технологии на основе полимерного воздействия.

На основе анализа литературных и патентных источников сформулированы задачи исследования диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены краткая геолого-физическая характеристика Вишнево-Полянского месторождения и результаты экспериментального исследования неоднородности объекта.

Вишнево-Полянское месторождение можно охарактеризовать как многопластовое, со сложным геологическим строением, с залежами нефти в терригенных и карбонатных отложениях. Основным интерес для разработки представляют отложения бобриковского горизонта, которые представлены переслаиванием песчаных пропластков с разделяющими их неколлекторами.

Разбуривание объекта осуществлялось по равномерной треугольной сетке с расстоянием между скважинами 400 метров. Поддержание пластового давления осуществляется с применением внутриконтурного, приконтурного и законтурного заводнения на Сульчинском, Вишнево-Полянском и Каргалинском поднятиях.

На 01.01.2016г отобрано около 60% от НИЗ, текущий КИН составил 0,217. Обводненность добываемой продукции около 83%.

Учитывая достаточно низкий коэффициент нефтеизвлечения объекта исследования, Вишнево-Полянское месторождение может рассматриваться как первоочередной объект для применения МУН. Поэтому актуальной задачей являются исследования неоднородности геолого-физических характеристик, состава и свойств насыщающих коллектор флюидов, которые в значительной степени определяют течение микропроцессов, происходящих в пласте.

Анализ изменчивости основных геолого-физических характеристик объекта выполнен на основе ранее проведенных исследований образцов керна, ГИС, ГДИ. Результаты приведены в табл.1.

Таблица 1 – Анализ неоднородности геолого-физических характеристик бобриковского горизонта Вишнево-Полянского месторождения

Параметр	Метод определения					
	ГИС		Керн		ГДИ	
	Ср. знач.	K <sub>ос</sub>	Ср. знач.	K <sub>ос</sub>	Ср. знач.	K <sub>ос</sub>
Общая толщина пласта, м	62,60	0,56	-	-	-	-
Эффективная толщина пласта, м	13,40	2,98	-	-	-	-
Эффективная нефтенасыщенная толщина пласта, м	10,60	1,68	-	-	-	-
Глубина залегания кровли продуктивного горизонта, м	1358,20	0,37	-	-	-	-
Глубина залегания подошвы продуктивного горизонта, м	1369,70	0,31	-	-	-	-
Коэффициент песчанистости, д.ед.	0,21	1,15	-	-	-	-
Коэффициент расчлененности, д.ед.	4,00	1,00	-	-	-	-
Коэффициент проницаемости, мкм <sup>2</sup>	0,87	3,07	0,46	7,21	0,26	1,15
Коэффициент пористости, д.ед.	0,24	0,81	0,23	1,19	-	-
Коэффициент начальной нефтенасыщенности д.ед.	0,91	0,59	0,89	0,72	-	-
P <sub>пл</sub> по данным добывающих скважин, МПа	-	-	-	-	11,10	0,80
P <sub>пл</sub> по данным нагнетательных скважин, МПа	-	-	-	-	15,07	0,49

На основе анализа основных геолого-физических параметров, определяющих течение физико-химических микропроцессов, охарактеризована макронеоднородность коллектора объекта исследования.

Исследование структуры пустотного пространства проводилось с применением томографических исследований с использованием микрофокусной системы рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии Nikon Metrology ХТ Н 225 и программного обеспечения Avizo 9.4.0 по восьми полноразмерным (100 мм) образцам керна, отобраным из двух скважин Вишнево-Полянского месторождения.

По одной скважине 4 образца керна были отобраны в интервале 1444,0 – 1449,0 м. (рис.1).



Рисунок 1 – Микрофотография образца керна (интервал отбора 1444,0-1449,0 м) на плоскость ХУ

Объем плотных включений в исследуемых образцах изменяется в среднем от 0,0001 до 3,08 мм<sup>3</sup>.

Исследование кернового материала на разрыв сплошности показало отсутствие трещин (сечения по осям образца представлены на рисунке 2).



Рисунок 2 – Микрофотографии образца керна (интервал отбора 1444,0-1449,0 м): поперечное сечение верхней трети образца (а), поперечное сечение середины образца (б), поперечное сечение нижней трети образца (в), продольное сечение вдоль оси Х (г)

Во второй скважине (4 образца керна) исследуемый материал отбирался в интервале 1496,0-1502,0 м (рис. 3). Средний объем включений составляет 0,003 - 0,01 мм<sup>3</sup>

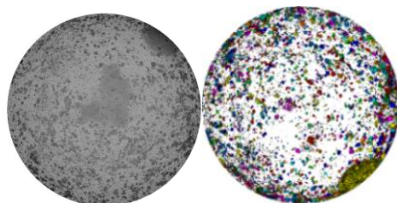


Рисунок 3 – Микрофотография образца керна (интервал отбора 1496,0-1502,0 м) на плоскость ХУ

На основе результатов томографических исследований структуры порового пространства образцов керна объекта, определения размеров пор коллектора (радиус от 10 до 700 мкм) и выделения характерных интервалов распределения их по размерам, установлено, что наиболее высокой неоднородностью характеризуются группа пор, имеющих радиус от 10

до 60 мкм (коэффициент вариации 0,59), а также радиусом от 208 до 620 мкм (коэффициент вариации 0,39).

Учитывая, что для более полного вытеснения остаточной нефти требуется снизить капиллярное давление не только в крупных, но и в мелких порах – наиболее эффективным способом достижения этого является применение ПАВ-полимерных композиций, способных обеспечить снижение капиллярного давления в 20-30 раз.

**В третьей главе** определена степень преобразованности и неоднородность геохимических характеристик нефти Вишнево-Полянского месторождения.

Учитывая, что изменчивость свойств нефти может оказать существенное влияние на эффективность применения технологий увеличения нефтеизвлечения, были проведены исследования молекулярно-массового распределения алканов 55 проб нефти бобриковско-радаевского горизонта Вишнево-Полянского месторождения. Исследования состава высоковязкой нефти выполнялись с использованием хроматографа Shimadzu GC 2010 Plus.

Перед проведением исследований осуществлялась подготовка пробы нефти центрифугированием. Часть пробы высоковязкой нефти разбавлялась растворителем в соотношении 1:10.

В целом, нефть, по группе исследованных скважин, характеризуется близкими кривыми молекулярно-массового распределения n-алканов C<sub>10</sub>-C<sub>40</sub>.

Сравнение значений параметров химического состава исследованных проб и базовых характеристик слабоизмененных нефтей позволило установить, что хотя характер молекулярно-массового распределения алканов характеризуется монотонным снижением концентрации углеводородов от n-C<sub>14</sub> до n-C<sub>34</sub>, однако в исследованных пробах нефти по сравнению со слабоизменёнными нефтями в углеводородном составе заметно меньше лёгких гомологов. В зависимости от глубины потери легких фракций максимальная концентрация приходится на C<sub>14</sub> (рис.4).

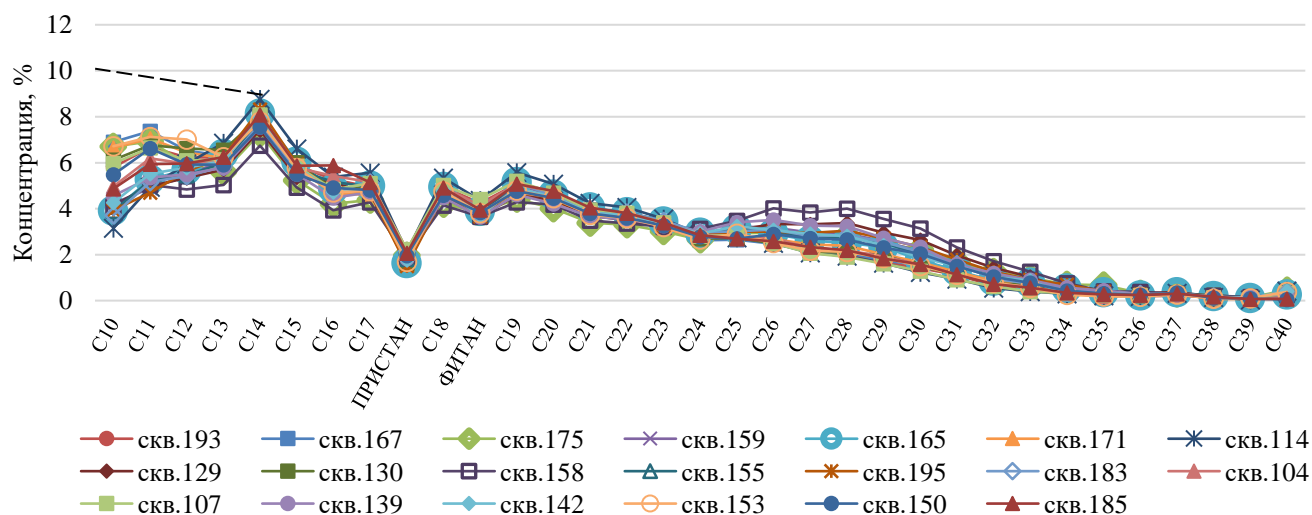


Рисунок 4 - Молекулярно-массовое распределение n-алканов проб нефти Вишнево-Полянского месторождения

Статистический анализ хроматографических параметров исследованных флюидов показал, что нефти Вишнево-Полянского месторождения характеризуются однородным молекулярно-массовым распределением n-алканов C<sub>10</sub>-C<sub>20</sub>, имеют одномодальный характер с максимумом в низкомолекулярной области (за исключением скважин 114, 129 и 195, где отмечено превышение коэффициента вариации над пороговым значением).

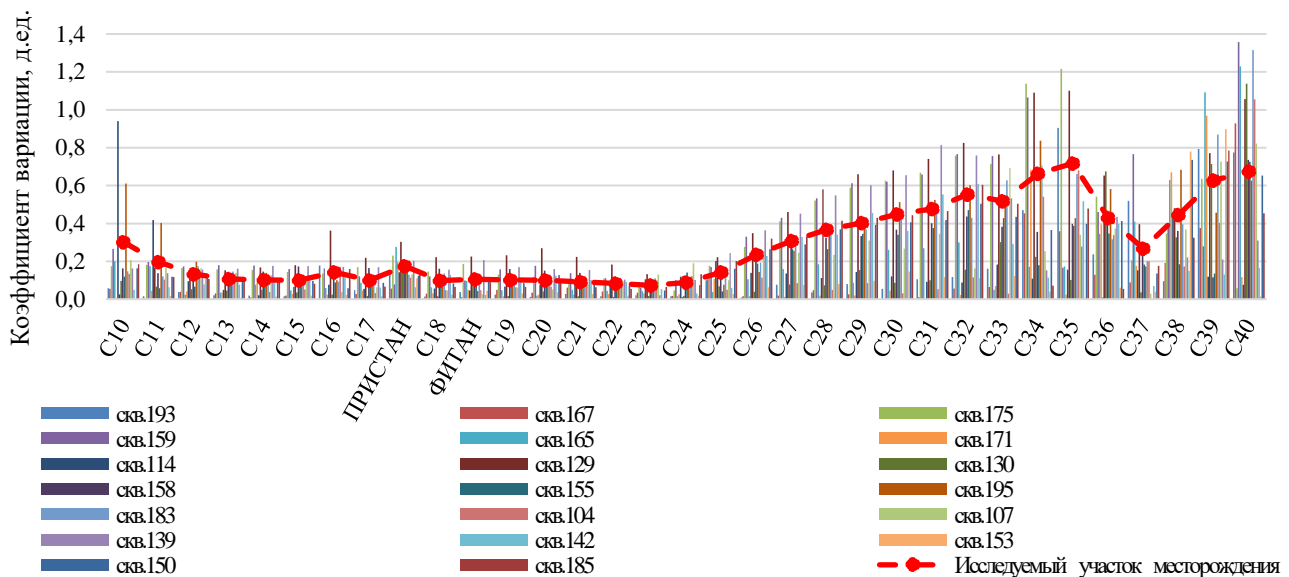


Рисунок 5 - Результаты статистического анализа компонентного состава проб высоковязкой нефти Вишнево-Полянского месторождения

Группа тяжелых компонентов  $C_{21}-C_{40}$  характеризуется как неоднородная, в ряде случаев коэффициент вариации превышал 1 (рис.5). Очевидно, это связано с различными условиями движения нефти по поровому пространству, взаимодействием с закачиваемой водой и породой коллектора, так как закономерности поведения и физико-химические свойства нефтяной системы в молекулярном или дисперсном состояниях даже при одинаковом химическом составе могут существенно различаться, что является причиной ее нелинейного отклика при изменении характера и величины внешних воздействий. Это обосновывает необходимость индивидуального подбора составов композиций для скважины или группы скважин при физико-химическом воздействии.

Исследования реологических свойств были выполнены по пробам нефти, отобранным из добывающих скважин пилотного участка Вишнево-Полянского месторождения. Для проведения исследований использовался ротационный вискозиметр Rheotest RN4.1, оборудованный термостатом с точностью поддержания температуры  $+0,1^{\circ}\text{C}$ . Определение эффективной вязкости проб нефти при разных скоростях и напряжениях сдвига проводилось в интервале температур от 20 до  $60^{\circ}\text{C}$ . На основании полученных данных строились зависимости вязкости нефти от скорости сдвига (рис.6,7).

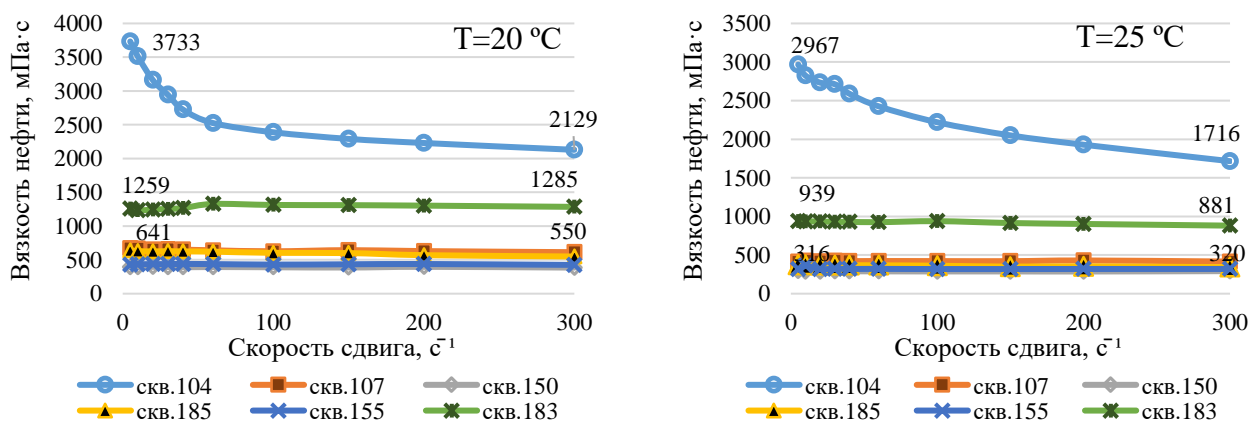


Рисунок 6 – Влияние градиента скорости сдвига на вязкость проб высоковязкой нефти Вишнево-Полянского месторождения в интервале температур от 20 до  $25^{\circ}\text{C}$

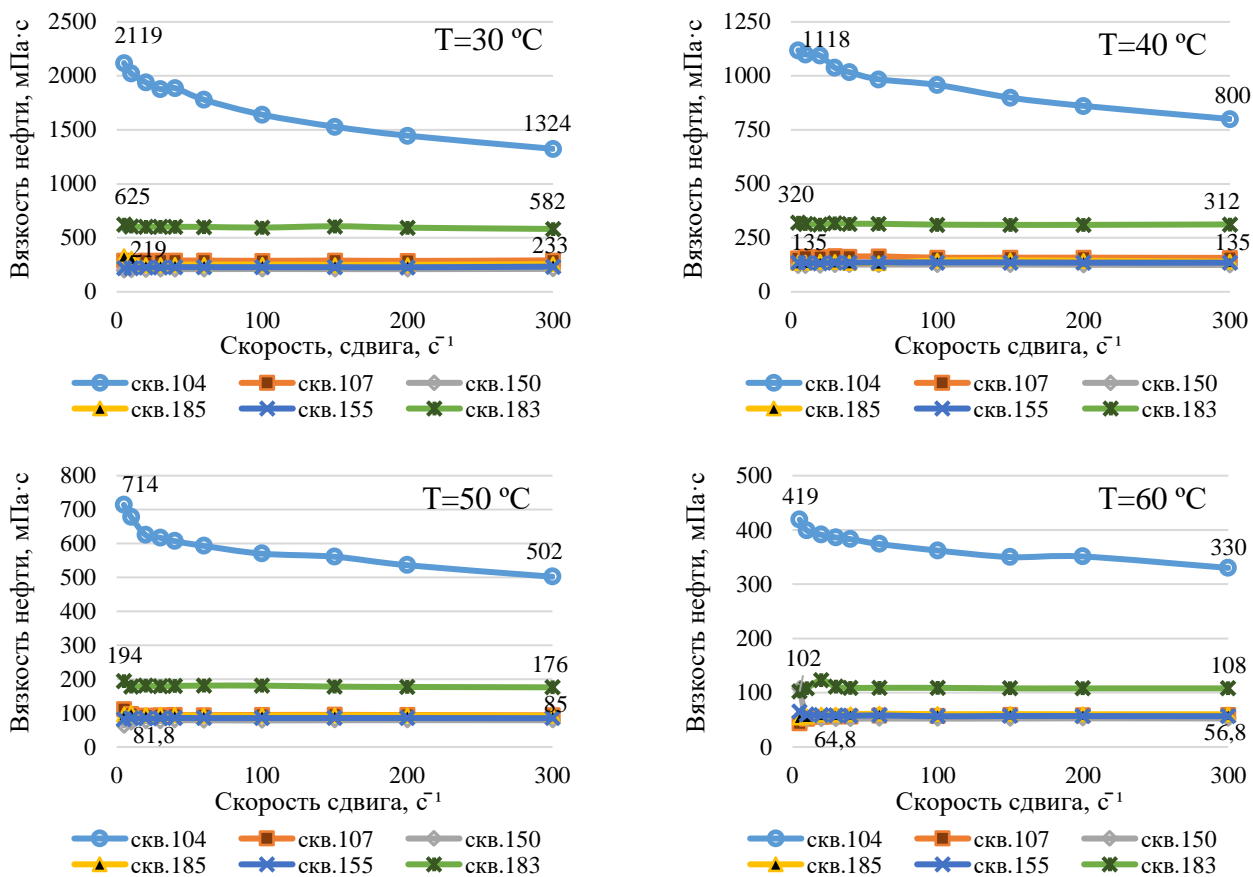


Рисунок 7 – Влияние градиента скорости сдвига на вязкость проб высоковязкой нефти Вишнево-Полянского месторождения в интервале температур от 30 до 60°C

По реологическим характеристикам нефть Вишнево-Полянского месторождения представляет собой типично неньютоновскую жидкость.

Для описания свойств неньютоновских жидкостей применяется понятие эффективной (или кажущейся) вязкости. Эффективная вязкость представляет собой некоторую условную характеристику, определяемую как отношение напряжения сдвига к скорости сдвига. При низких скоростях и напряжениях сдвига для всех проб характерно высокое значение эффективной вязкости, что соответствует неразрушенной внутренней структуре.

Вариабельность структурно-механических свойств исследованных проб нефти высокая (коэффициент вариации изменяется от 0,76 до 1,20), что обусловлено высокой неоднородностью нефти Вишнево-Полянского месторождения по концентрации высокомолекулярных компонентов вследствие изменения пластовых условий и техногенного воздействия.

Анализ неоднородности оптических свойств нефти проводился на основе исследований, выполненных с использованием сканирующего спектрофотометра UV-1800 компании Shimadzu. Результаты сохранялись в виде кривых поглощения для различных длин волн исследуемых проб нефти (рис.8).

Наблюдаемое поглощение при длинах волн 410 нм и 573 нм указывает на наличие в исследуемых пробах нефти ванадиевых порфиринов и этиопорфиринов (химическая формула  $C_{32}H_{36}N_4OV$ ). Параметр  $(D_{440D490})/(D_{590D665})$  для проб нефти Вишнево-Полянского месторождения менее 1, что может свидетельствовать о наличии ароматических углеводородов в исследуемых пробах высоковязкой нефти.

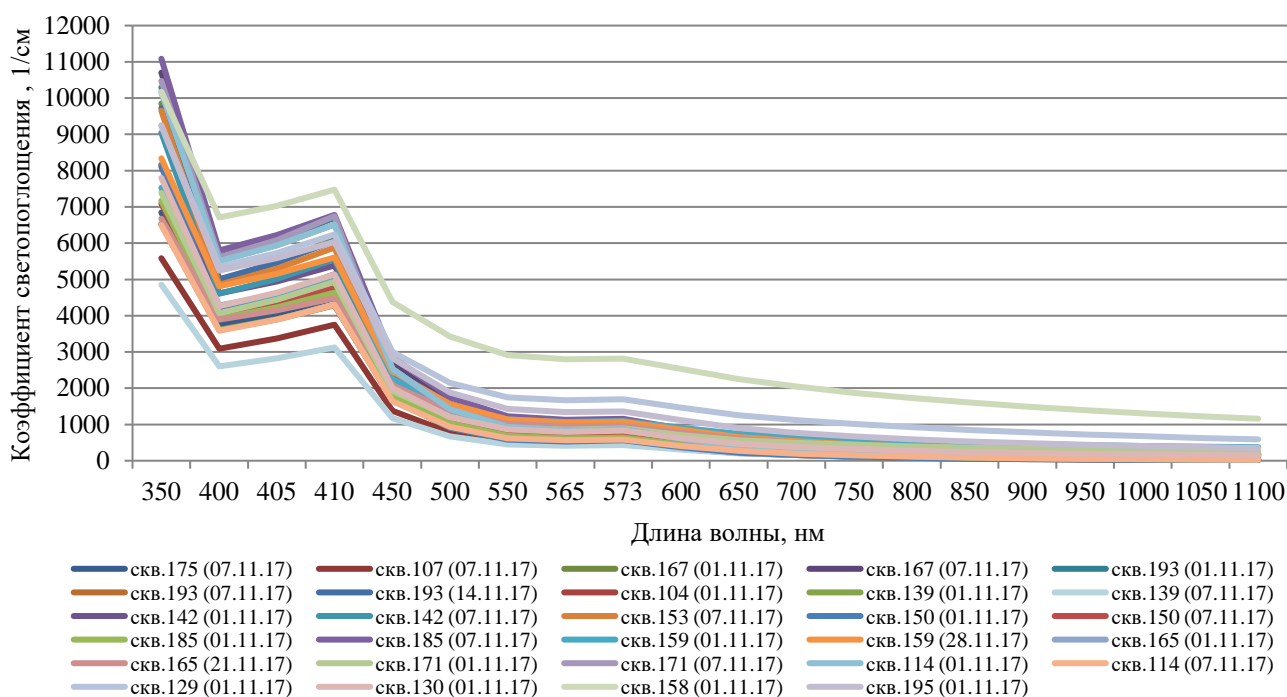


Рисунок 8 – Изменение коэффициента светопоглощения проб высоковязкой нефти Вишнево-Полянского месторождения

По параметру D465/D665 пробы нефти со скважин Вишнево-Полянского месторождения можно разделить на два вида: более «легкие» и более «тяжелые». В целом, исследуемую нефть можно охарактеризовать как нефть с высоким содержанием тяжелых компонентов.

При проектировании физико-химических технологий воздействия на пласт важное значение имеет состояние сложных структурных единиц нефти. Для выявления взаимосвязей характеристик реологического поведения со строением структурных образований исследуемой высоковязкой нефти проведено изучение прочности ассоциатов нефтяных систем при изменении температурных условий.

Используя зависимость вязкости от температуры можно определить энергию активации, характеризующую интенсивность межмолекулярного взаимодействия в нефтяной системе, подчиняющуюся закону Аррениуса-Френкеля-Эйринга:

$$\eta = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость, мПа·с,

$A$  – коэффициент, предэкспоненциальный множитель, зависящий от геометрической структуры частиц (молекул),

$E$  – энергия активации, Дж/моль,

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31451 Дж/(моль·К),

$T$  – температура, °К.

Логарифмируя уравнение (1), получаем:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E}{RT} \quad (2)$$

$$\text{или} \quad \ln \eta = \ln A + \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

Обработка результатов экспериментальных исследований в координатах  $\ln \eta - 1/T$  (рис. 9-10) дает возможность определить значения энергии активации вязкого течения.

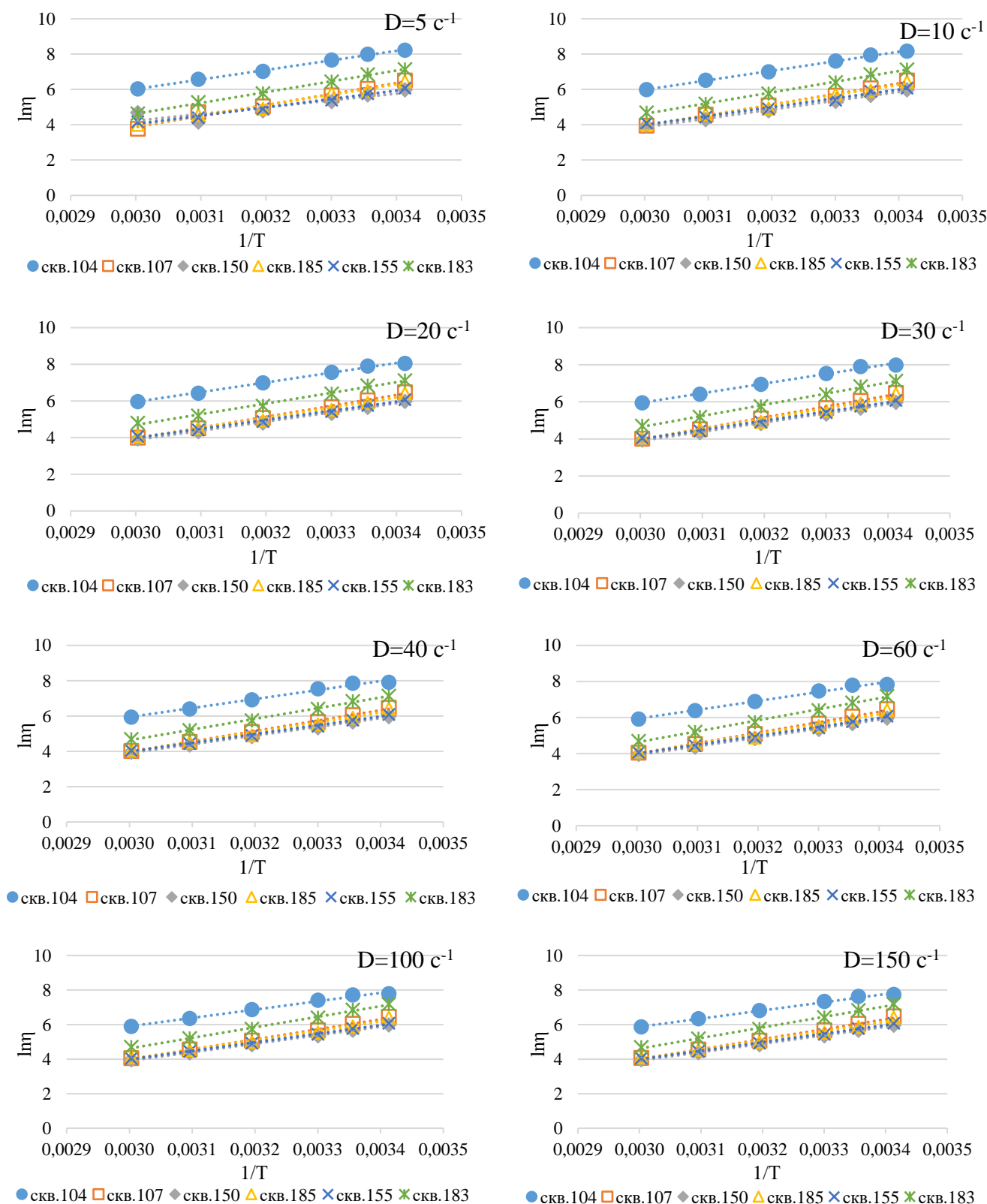


Рисунок 9 – Зависимость логарифма вязкости от обратной температуры для нефти Вишнево-Полянского месторождения (при скорости сдвига от 5 до 150  $\text{c}^{-1}$ )

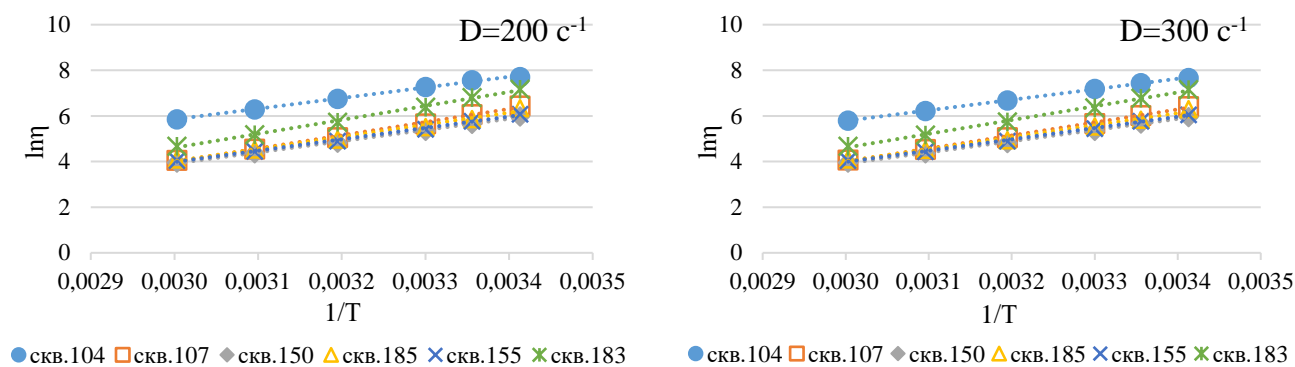


Рисунок 10 – Зависимость логарифма вязкости от обратной температуры для нефти Вишнево-Полянского месторождения (при скорости сдвига от 200 до 300 с<sup>-1</sup>)

Рассчитано значение энергии активации вязкого течения, которое в зависимости от температуры и скорости сдвига изменяется от 31,978 кДж/моль до 51,543 кДж/моль.

Для высоковязкой нефти не было выявлено каких-либо резких изменений в структуре нефтяной дисперсной системы при увеличении температуры от 20 до 60°С. Следовательно, структурные образования данной нефти можно охарактеризовать как устойчивые к сдвиговому и температурному воздействию, что обосновывает необходимость применения в условиях объекта физико-химических методов нефтеизвлечения.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований, выполненные в соответствии с разработанными методиками по обоснованию составов ПАВ-полимерных композиций для увеличения извлечения высоковязкой нефти. Были исследованы различные типы ПАВ – неионогенный ПАВ (НПАВ) и катионсодержащий комплексный ПАВ (КПАВ).

На основе термодинамического анализа сил, действующих на трехфазном контакте «масло - твердая поверхность-вода» на основе уравнений, определяющих количественную связь между физико-химическими свойствами нефтевытесняющего раствора, природой подложки и дополнительной механической работой  $A_m$ , необходимой для отмывания нефти с твердой поверхности в зависимости от поверхностных сил, выраженных через краевые углы смачивания и межфазные поверхностные натяжения установлено, что поверхностное натяжение и размеры капель оказывают существенное влияние на процессы вытеснения. В зависимости от состава нефти, свойств поверхности коллектора и смачиваемости вытесняющей жидкостью диапазон изменения дополнительной работы, необходимой для отрыва (отмывания) нефти, может изменяться в сотни тысяч раз. Это послужило основой начала исследований, направленных на поиск высокоэффективных технологий увеличения извлечения высоковязкой нефти с использованием композиций, которые позволят регулировать свойства межфазных слоев.

Измерение межфазного натяжения растворов ПАВ проводилось на границе с нефтью Вишнево-Полянского месторождения. Готовились растворы неионогенного ПАВ в минерализованной воде и катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде концентрацией от 0,1 до 0,4%. Перед проведением исследований осуществлялось обезвоживание нефти центрифугированием. Измерение межфазного натяжения растворов на границе с нефтью проводилось на тензиометре DataPhysics DCAT 11 EC при комнатной

температуре и атмосферном давлении. Результаты исследований и оценка неоднородности изменения поверхностного натяжения для различных проб нефти представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Величина межфазного натяжения на границе с нефтью скважин Вишнево-Полянского месторождения

Параметр	Межфазное натяжение, мН/м				Коэффициент вариации по скважинам	Межфазное натяжение, мН/м			Коэффициент вариации по скважинам
	По скважине 139	По скважине 185	По скважине 195	Среднее значение по скважинам		По скважине 139	По скважине 185	Среднее значение по скважинам	
Без ПАВ	Минерализованная вода					Пресная вода			
	35,25	33,56	37,55	35,45	0,05	20,26	19,41	19,83	0,03
Концентрация ПАВ в растворе, %	Раствор неионогенного ПАВ в минерализованной воде					Раствор катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде			
0,1%	5,7	2,55	3,04	3,76	0,39	1,06	2,17	1,61	0,38
0,2%	4,48	2,04	2,7	3,07	0,36	0,93	1,93	1,43	0,38
0,3%	3,64	1,2	1,93	2,26	0,48	0,7	1,89	1,3	0,50
0,4%	2,98	1,02	1,68	1,89	0,46	0,67	1,84	1,25	0,52

Как видно из табл.2, снижение межфазного натяжения на границе «раствор ПАВ-нефть» определяется как концентрацией и типом ПАВ, так и составом нефти. Межфазное натяжение на границе «нефть – минерализованная вода» и «нефть-пресная вода» составляет 35,45 и 19,83 мН/м с коэффициентами вариации 0,05 и 0,03 соответственно, что свидетельствует о достаточно высокой однородности данной величины. Максимальная величина поверхностного натяжения на границе с минерализованной водой отмечена для проб нефти со скважины 195, имеющей наибольшую концентрацию углеводородов C<sub>10</sub>-C<sub>22</sub>.

Как видно из табл.2, по анализируемым скважинам в зависимости от состава проб нефти диапазон изменения межфазного натяжения, который обеспечивается идентичным раствором ПАВ определенной концентрации, может отличаться в 1,5-2 раза, при отличии соотношения легких и тяжелых углеводородов на 25%.

Фундаментальным свойством ПАВ является их способность адсорбироваться на межфазных границах, которыми могут быть как границы «жидкость-жидкость» так и «твердое тело-жидкость». Однако, при адсорбции ПАВ на твердой поверхности могут быть их существенные потери, что обуславливает не только снижение поверхностной активности вытесняющей жидкости, но и возможную гидрофобизацию поверхности коллектора, изменение его фильтрационных свойств и ухудшение подвижности нефти.

Исследования адсорбции неионогенного ПАВ и катионсодержащего комплексного ПАВ проводились на основе статических опытов, в которых использовались образцы дезинтегрированного ядра Вишнево-Полянского месторождения. Изотермы адсорбции на границе «водный раствор ПАВ-ядро» строились на основе серии экспериментов по определению адсорбции из растворов с исходной концентрацией ПАВ 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 % через 24 часа.

Оценка изменения концентрации проводилась спектрофотометрическим методом. При проведении экспериментов использовался спектрофотометр Shimadzu UV-1800. Концентрация

ПАВ определялась по изменению коэффициента светопоглощения раствора на основе калибровочной кривой, построенной для различных концентраций ПАВ. Результаты по определению адсорбции представлены на рисунке 11.

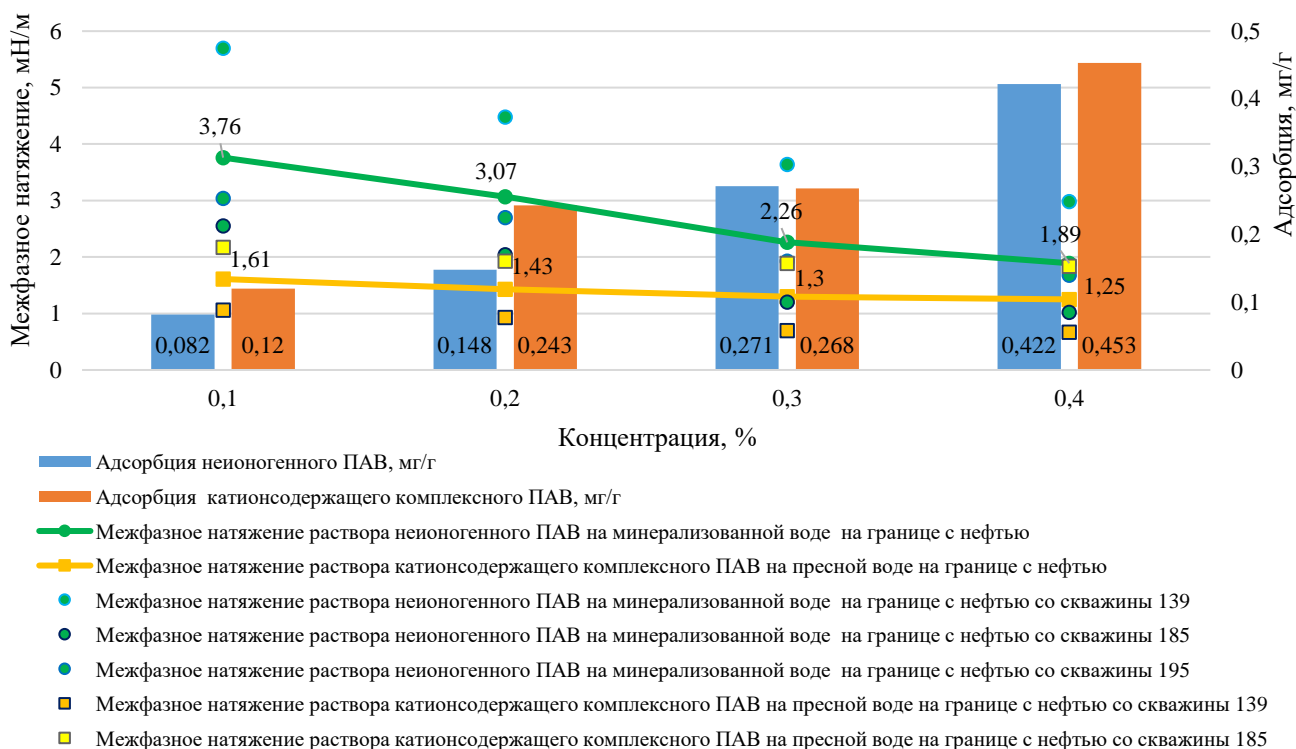


Рисунок 11 – Изотермы поверхностного натяжения и адсорбции растворов неионогенного ПАВ в минерализованной воде и комплексного ПАВ в пресной воде

Как видно из рис.11 при увеличении концентрации неионогенного ПАВ в растворе минерализованной воды от 0,1% до 0,4% происходит снижение межфазного натяжения на границе с нефтью от 3,76 мН/м до 1,89 мН/м. При этом отмечается излом кривой, что свидетельствует о начале ассоциации ПАВ. При использовании комплексного ПАВ увеличение концентрации ПАВ от 0,1 до 0,4 % не приводит к существенному снижению межфазного натяжения (на 22,4%), при этом адсорбция увеличивается более чем в 3,8 раза.

Для учета степени адсорбционных потерь предложено использование комплексного параметра, характеризующего удельное снижение концентрации ПАВ в растворе вследствие адсорбции на твердой поверхности на единицу снижения поверхностного натяжения в заданном диапазоне увеличения концентраций:

$$K = \frac{\sigma_{c1} - \sigma_{c2}}{\Gamma_{c2} - \Gamma_{c1}} \quad (4)$$

где  $\sigma_{c1}$  - величина межфазного натяжения на границе «нефть-раствор ПАВ» концентрацией  $C_1$ , мН/м;

$\sigma_{c2}$  - величина межфазного натяжение на границе «нефть-раствор ПАВ» концентрацией  $C_2$ , мН/м;

$\Gamma_{c2}$  – адсорбция на поверхности дезинтегрированного ядра при концентрации  $C_2$  (после 24 часов), мг/г;

$\Gamma_{C1}$  – адсорбция на поверхности дезинтегрированного зерна при концентрации  $C_1$  (после 24 часов), мг/г.

В соответствии с формулой (4) определены величины комплексного параметра  $K$  для раствора неионогенного ПАВ в минерализованной воде, который составляет 5,5 и для раствора катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде – 1,1. При расчете учитывалось изменение межфазного натяжения и адсорбции в диапазоне концентраций от 0,1 до 0,4% за 24 часа.

Таким образом, для повышения успешности физико-химического воздействия при добыче высоковязкой нефти предложен алгоритм исследований и комплексный параметр, обеспечивающий оперативный и адресный выбор ПАВ в условиях конкретной скважины или участка.

Для определения применимости полимеров, входящих в состав ПАВ-полимерных композиций, в условиях Вишнево-Полянского месторождения проводились исследования их физико-химических свойств. Наиболее используемыми полимерами в технологиях добычи нефти являются ПАА и биополимер «ксантан», которые широко применяются на месторождениях ПАО «Татнефть».

Определялись такие свойства полимеров, как молекулярная масса (для ПАА составляет  $6,1 \cdot 10^6$  г/моль), степень гидролиза (для ПАА составляет 8,65%), скрин-фактор (для ПАА концентрацией 0,1% составляет 27 ( $\rho=1,0$  кг/см<sup>3</sup>), 20,3 ( $\rho=1,09$  кг/см<sup>3</sup>) и 16,5 ( $\rho=1,164$  кг/см<sup>3</sup>)) и динамическая вязкость (для ПАА концентрацией 0,3% на пресной воде - 15,5 мПа·с; для ПАА концентрацией 0,3% на минерализованной воде – 10,9 мПа·с; для биополимера концентрацией 0,2% на пресной воде – 18,2 мПа·с; для биополимера концентрацией 1% на пресной воде при скорости сдвига  $6,5$  с<sup>-1</sup> – 4006,9 мПа·с).

Реологические исследования полимерных растворов и ПАВ-полимерных композиций выполнялись при температуре 20-40 °С и в интервале скорости сдвига от 0 до 700 с<sup>-1</sup> (рис.12-14).

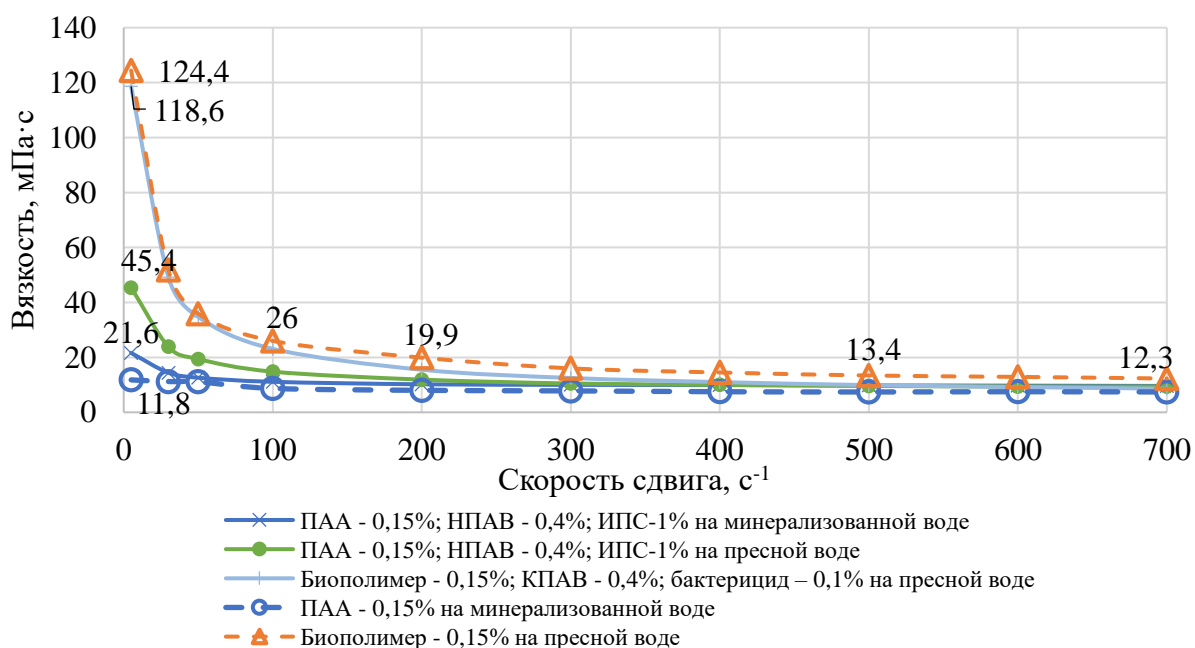


Рисунок 12 – Изменение динамической вязкости композиций от скорости сдвига при температуре 20<sup>0</sup>С

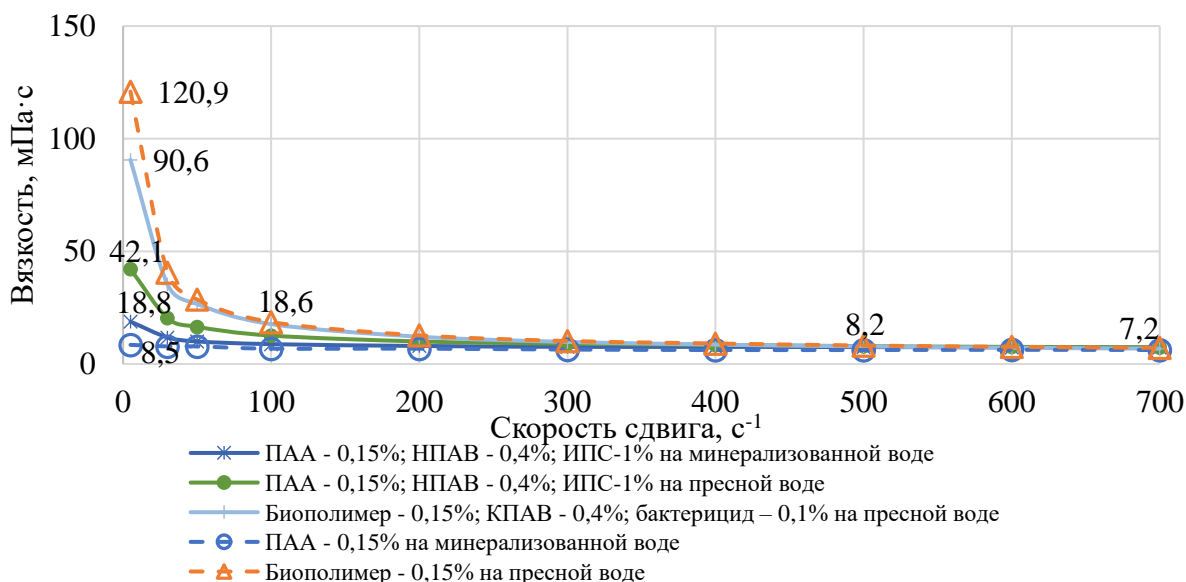


Рисунок 13 - Изменение динамической вязкости композиций от скорости сдвига при температуре 30<sup>0</sup>С

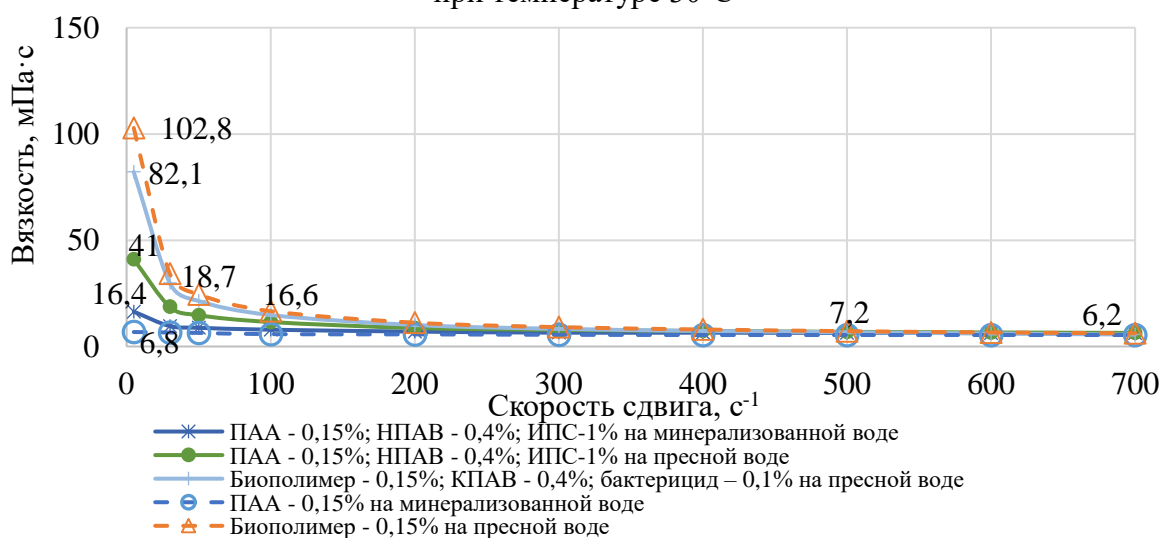


Рисунок 14 - Изменение динамической вязкости композиций от скорости сдвига при температуре 40<sup>0</sup>С

На основе комплекса экспериментальных исследований установлено, что добавление к раствору биополимера катионсодержащего комплексного ПАВ концентрацией 0,4% и бактерицида 0,1% в интервале скорости сдвига от 0 до 100  $c^{-1}$  обеспечивает сохранение вязкоупругих свойств композиции в диапазоне температур 20-30 °С.

Проводились определения дисперсности проб искусственной эмульсии и определялась коллоидная устойчивость нефти после взаимодействия с ПАВ-полимерными композициями.

Исследования эмульсий выполнялись с применением микроскопа Leica DM 750 P и комплекса аппаратно-программного анализа изображений NEXSYS Image Expert. Фиксировалась структура эмульсии (мелкодисперсная – размер капель воды 0,2-20 мкм, среднедисперсная – размер капель воды 20-50 мкм и грубодисперсная – размер капель воды более 50 мкм) и процентное соотношение глобул различной структуры в исследуемом образце.

Предварительно исследовалась структура эмульсии во времени (30, 60, 90 и 120 минут) при добавлении неионогенного ПАВ и катионсодержащего комплексного ПАВ концентрацией от 0,2% до 0,5% (рис.15,16).

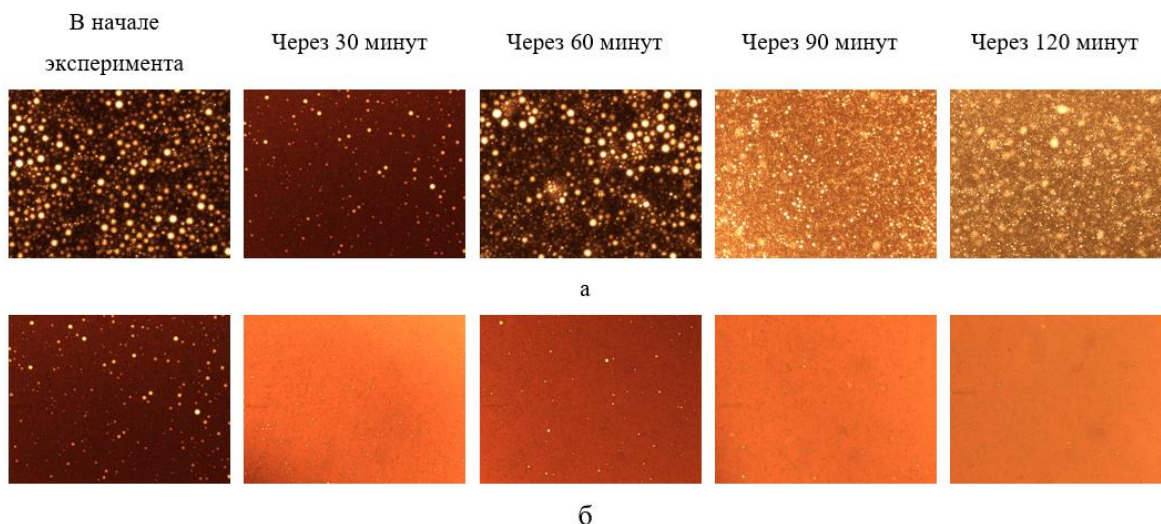


Рисунок 15 – Микрофотографии эмульсии (водосодержание 50%) без катионсодержащего комплексного ПАВ (контрольная проба) (а); с катионсодержащим комплексным ПАВ концентрацией 0,4% (б)

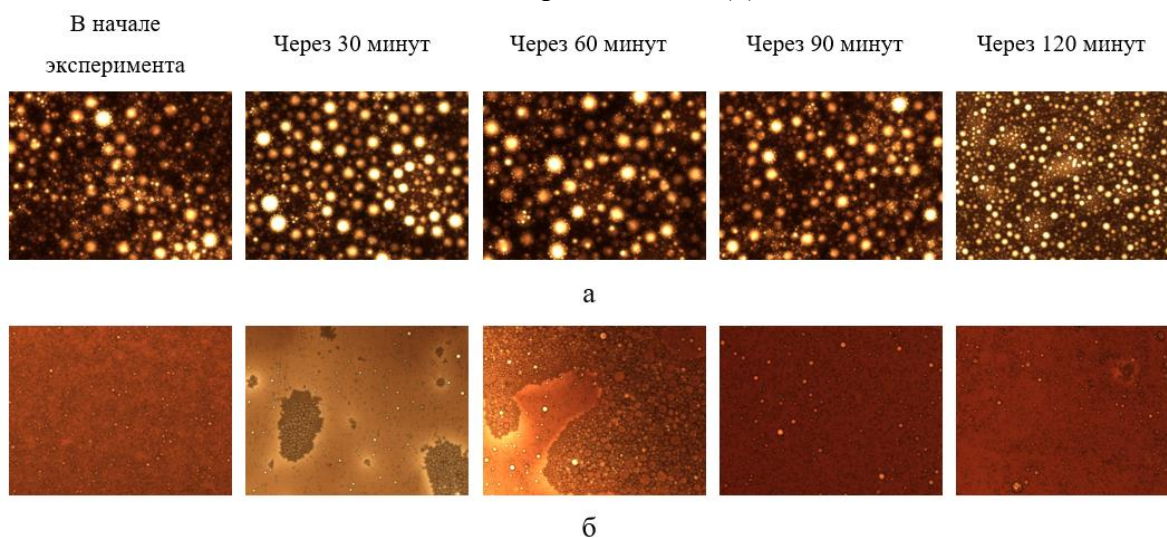


Рисунок 16 – Микрофотографии эмульсии (водосодержание 50%) без неионогенного ПАВ (контрольная проба) (а); с добавлением неионогенного ПАВ концентрацией 0,4% (б)

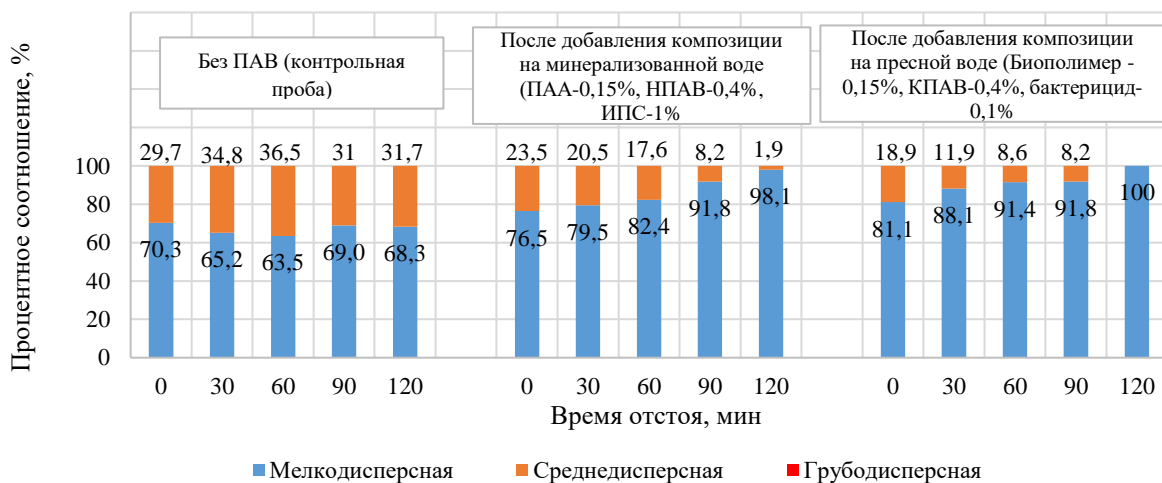


Рисунок 17 – Процентное соотношение дисперсности эмульсии контрольной пробы и после добавления композиций на минерализованной и пресной воде

Оценка влияния ПАВ-полимерных композиций на коллоидную устойчивость нефти проводилась на основании результатов оптических методов исследования с использованием сканирующего спектрофотометра Shimadzu UV-1800.

На спектрофотометре проводилась съемка верхнего и нижнего слоя пробы нефти после взаимодействия с ПАВ-полимерными композициями, концентрация которых варьировалась от 2 до 14% с шагом 2%. Определялись такие параметры как коэффициент светопоглощения при 410 нм, коррелирующий с содержанием ванадиевых порфиринов, коэффициент светопоглощения при 540 нм, характеризующий содержание хромофорных соединений, соотношение поглощения при 465 нм к поглощению при 665 нм (D465/D665), характеризующее тип нефти по плотности.

Для оценки влияния ПАВ-полимерных композиций на коллоидную устойчивость нефти определялся коэффициент коллоидной устойчивости нефти по формуле (5):

$$K_{410} = \frac{K_{\text{сп BC}}}{K_{\text{сп HC}}} \quad (5)$$

где  $K_{\text{сп BC}}$  – коэффициент светопоглощения верхнего слоя пробы нефти при длине волны 410нм;

$K_{\text{сп HC}}$  – коэффициент светопоглощения нижнего слоя пробы нефти при длине волны 410нм.

На основе оптических и микроскопических исследований установлено, что коэффициент коллоидной устойчивости при взаимодействии нефти с разработанными композициями меняется от 0,8 до 1,3. Добавление композиций приводит к увеличению дисперсности эмульсии, что способствует вытеснению глобул нефти из пор соответствующих размеров.

В результате проведенных исследований расширенного перечня параметров пластовой системы предложен первичный скрининг условий применимости разработанных ПАВ—полимерных композиций.

Таблица 3 – Первичный скрининг условий применимости разработанных ПАВ-полимерных композиций

Параметр	Значение
1	2
Объект воздействия	Терригенный коллектор тульского и бобринского горизонтов
Радиус пор коллектора, мкм	10-700
Коэффициента пористости, д.ед.	0,088-0,365
Коэффициент проницаемости, $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>	8,8-3320
Коэффициент нефтенасыщенности, д.ед.	0,337-0,975
Вязкость пластовой нефти, мПа·с	до 160
Плотность пластовой нефти, кг/м <sup>3</sup>	900-920
Общая минерализация пластовой воды, г/дм <sup>3</sup>	до 8000
Тип пластовой воды (по В.А. Сулину)	Хлоркальциевый
Энергия активации вязкого течения, кДж/моль	30 - 55
Межфазное натяжение раствора неионогенного ПАВ в минерализованной воде на границе с нефтью (концентрация ПАВ в растворе 0,1-0,4% масс.), мН/м	1-6

Продолжение таблицы 3

1	2
Межфазное натяжение раствора катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде на границе с нефтью (концентрация ПАВ в растворе 0,1-0,4% масс.), мН/м	0,5-3

Эффективность разработанных композиций для вытеснения высоковязкой нефти в условиях Вишнево-Полянского месторождения подтверждена результатами фильтрационных исследований, выполненных на установке для исследования кернов УИК-4, в соответствии с которыми прирост коэффициента вытеснения для композиции на минерализованной воде (ПАА, НП АВ, ИПС) составляет 19,6%, для композиции на пресной воде (биополимер, КП АВ, бактерицид) - 36,6%.

Для проведения опытно-промышленных испытаний в условиях Вишнево-Полянского месторождения на основе результатов экспериментальных исследований разработана программа исследовательских испытаний технологического процесса применения ПАВ-полимерных композиций. Определены скважины-кандидаты для реализации технологического процесса применения ПАВ-полимерных композиций на минерализованной и пресной воде.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена макро- и микронеоднородность коллектора бобриковско-радаевского горизонта объекта исследования. На основе результатов томографических исследований структуры порового пространства образцов керна объекта, определены размеры пор коллектора (радиус от 10 до 700 мкм). Для условий высокой неоднородности пор коллектора (коэффициент вариации 0,39-0,59) обосновано применение ПАВ-полимерных композиций в условиях Вишнево-Полянского месторождения.

2. По результатам хроматографических исследований установлена неоднородность высоковязкой нефти по концентрации высокомолекулярных компонентов  $C_{21}-C_{40}$  (коэффициент вариации до 1,36). Молекулярно-массовое распределение алканов образцов нефти характеризуется монотонным снижением концентрации углеводородов от  $n-C_{14}$  до  $n-C_{34}$  и существенно меньшей концентрацией, по сравнению со слабоизменёнными нефтями, лёгких гомологов. Таким образом, обоснована необходимость индивидуального подбора составов композиций для скважины или группы скважин при физико-химическом воздействии.

3. На основе реологических исследований показана высокая вариабельность структурно-механических свойств нефти (коэффициент вариации от 0,76 до 1,20). На основе выявления взаимосвязей характеристик реологического поведения со строением структурных образований и определения энергии активации вязкого течения (от 31,978 кДж/моль до 51,543 кДж/моль) определена устойчивость структурных образований нефти к внешнему сдвиговому и термическому воздействию, что обосновывает необходимость применения в условиях объекта ПАВ-полимерного воздействия.

4. Установленная кинетика снижения поверхностного натяжения (от 3,76 до 1,89 мН/м для неионогенного ПАВ в минерализованной воде, от 1,61 до 1,25 мН/м для катионсодержащего комплексного ПАВ в пресной воде) в диапазоне концентраций ПАВ от 0,1 до 0,4% показала существенное влияние на данный процесс не только типа ПАВ, но и свойств

нефти. Диапазон изменения межфазного натяжения, который обеспечивается идентичным раствором ПАВ определенной концентрации, отличается в 1,5-2 раза, таким образом показана необходимость индивидуального подхода (для условий участка при выборе раствора ПАВ).

5. В соответствии с разработанными методиками выполненные комплексные исследования динамики межфазного натяжения и адсорбции различных составов ПАВ позволили научно обосновать комплексный параметр для сравнительной экспресс-оценки ПАВ для условий конкретного объекта внедрения. Для Вишнево-Полянского месторождения рассчитано значение параметра  $K$ , которое для неионогенного ПАВ составляет 5,5, для катионсодержащего комплексного ПАВ – 1,1.

6. На основе комплекса экспериментальных исследований установлено, что добавление к раствору биополимера катионсодержащего комплексного ПАВ концентрацией 0,4% и бактерицида 0,1% в интервале скорости сдвига от 0 до 100  $\text{с}^{-1}$  обеспечивает сохранение вязкоупругих свойств композиции в диапазоне температур 20-30 °С.

7. В результате исследований установлено, что ПАВ-полимерные композиции на минерализованной и пресной воде не оказывают значительного влияния на коллоидную устойчивость добываемой нефти (коэффициент коллоидной устойчивости изменяется от 0,8 до 1,3).

8. В результате проведенных исследований расширенного перечня параметров пластовой системы предложен первичный скрининг условий применимости разработанных ПАВ—полимерных композиций для использования при проектировании разработки месторождений, характеризующихся схожими условиями.

9. В результате фильтрационных исследований было выявлено, что применение ПАВ-полимерных композиций приводит к повышению коэффициента вытеснения (при использовании композиций на минерализованной воде - 19,6%, на пресной воде - 36,6%), что позволяет рекомендовать данные композиции для опытно-промышленных испытаний в условиях Вишнево-Полянского месторождения.

10. Для проведения опытно-промышленных испытаний в условиях Вишнево-Полянского месторождения на основе результатов экспериментальных исследований разработана программа исследовательских испытаний технологического процесса применения ПАВ-полимерных композиций и определены скважины-кандидаты.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемых научных изданиях:*

1. Хисамов, Р.С. Результаты экспериментальных исследований динамики состава подвижной части остаточных запасов нефти бобриковско-радаевского горизонта Вишнево-Полянского месторождения на основе хроматографических исследований / Р.С. Хисамов, И.А. Гуськова, Л.Р. Шайхразиева, А.В. Насыбуллин // Нефтяное хозяйство. – 2019. - №8. – С.118-121.
2. Гуськова, И.А. Анализ результатов экспериментальных исследований физико-химических параметров растворов поверхностно-активных веществ на основе минерализованной и пресной воды / И.А. Гуськова, Л.Р. Шайхразиева // Сетевое научное издание «Нефтяная провинция». – 2019. - №2 (18). – С.163-173.
3. Шайхразиева, Л.Р. Применение томографических исследований ядра для обоснования применения ПАВ в технологиях увеличения нефтеизвлечения / Л.Р. Шайхразиева, Е.В. Орехов, Д.А. Аленькин // Сетевое научное издание «Нефтяная провинция». – 2019. - №2 (18). – С.43-54.

### *В других научно-технических изданиях:*

4. Шайхразиева, Л.Р. Исследования эффективности химреагентов, применяемых в технологиях увеличения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью / Л.Р. Шайхразиева // Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли»: сб. статей. – Альметьевск, 2018. - С. 110-114.
5. Шайхразиева, Л.Р. Обзор существующих методов разработки месторождений высоковязкой нефти / Л.Р. Шайхразиева // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института: сб. статей. – Альметьевск, 2019. - Т. 18. - С. 68-70.
6. Шайхразиева, Л.Р. Применение поверхностно активных веществ в технологиях увеличения нефтеотдачи пластов / Л.Р. Шайхразиева // Тезисы докладов 73-ей Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ»-2019». - Москва, 2019. – Т.1. – С. 346.
7. Шайхразиева, Л.Р. Оценка свойств поверхностно-активных веществ для подбора нефтewытесняющей композиции, применимой в условиях месторождений высоковязкой нефти / Л.Р. Шайхразиева // Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля. – Санкт-Петербург, 2019. – С.120.
8. Шайхразиева, Л.Р. Методы определения свойств поверхностно-активных веществ / Л.Р. Шайхразиева // Сборник материалов региональной студенческой научно-практической конференции «Молодые нефтяники». – Альметьевск, 2019. – С.24.
9. Будкевич, Р.Л. Оценка физико-химических свойств поверхностно-активных веществ, применяемых для выработки трудноизвлекаемых запасов нефти / Р.Л. Будкевич, Л.Р. Шайхразиева // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института: сб. статей. – Альметьевск, 2018. - Т. 17. - С. 7-10.
10. Будкевич, Р.Л. Исследование свойств поверхностно-активных веществ для интенсификации добычи нефти / Р.Л. Будкевич, Л.Р. Шайхразиева // Булатовские чтения. – 2018. – Т.2-1. – С.91-93.
11. Саяхов, В.А. Исследование изменения компонентного состава сверхвязкой нефти при нагреве / В.А. Саяхов, Л.Р. Шайхразиева, Н.К. Исроилов // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: сб. статей. – Тюмень, 2017. – С.109-115.