

**АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА**

*На правах рукописи*

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТА СЛОЖНЫХ  
РЕОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Специальность:** 2526.01 - Технология разработки морских  
месторождений полезных ископаемых

**Отрасль науки:** Технические науки

**Соискатель:** Мустафаева Гюльшан Расул кызы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора наук по технике

**Баку – 2025**

Диссертационная работа была выполнена в Научно-исследовательском и Проектном Институте Нефти и Газы SOCAR.

**Научные консультанты:**

Член-корреспондент НАНА, доктор технических наук, профессор

**Тулпархан Шарабудинович Салаватов**

доктор технических наук, профессор  
**Сакит Рауф оглы Расулов**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, доцент  
**Гаджан Гулу оглы Гаджиев**  
доктор технических наук, профессор  
**Мубариз Мустафа оглы Велиев**  
доктор технических наук  
**Вугар Магеррам оглы Фаталиев**  
доктор технических наук, доцент  
**Мубариз Севдималы оглы Халилов**

Диссертационный совет ВЕД 2.03 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующей на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности

**Председатель**

диссертационного совета: \_\_\_\_\_

доктор технических наук, доцент  
**Ариф Алекбер оглы Сулейманов**

**Ученый секретарь**

диссертационного совета: \_\_\_\_\_

доктор философии по технике, доцент  
**Елена Евгеньевна Шмончева**

**Председатель научного семинара:** \_\_\_\_\_

Член-корреспондент НАНА, доктор технических наук, проф  
**Гариб Исае оглы Джалалов**

**Заверяю подписи:**

Ученый секретарь АГУНП,

к.т.н., доцент

**Нармина Тарлан кызы Алиева**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы.** В настоящее время нефтяная промышленность играет ключевую роль в мировой экономике, оказывая значительное влияние на развитие других отраслей. Для многих государств, в том числе Азербайджана, добыча и переработка нефти остаются основным источником дохода. Однако, низкий уровень извлечения запасов нефти и замедление темпов добычи стали значимой проблемой.

Все большее внимание уделяется добыче высоковязких нефтей, обладающих неньютоновскими свойствами. Такие нефти характеризуются высокой вязкостью и низкой подвижностью, что затрудняет их добычу и транспортировку. На сегодняшний день существующие технологии добычи этих типов нефти не получили широкого применения из-за высоких капитальных затрат.

Не извлекаемые остаточные запасы нефти могут составлять от 55% до 75% от первоначальных геологических запасов, что подчеркивает необходимость разработки новых методов для их эффективного извлечения.

В добыче нефти и газа на морских месторождениях также возникают дополнительные сложности, связанные с присутствием песка, парафина и других примесей в продуктах. Эти факторы могут приводить к образованию асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО), что увеличивает сложности эксплуатации и требует частых ремонтных работ.

Все эти факторы создают дополнительные трудности при проектировании и эксплуатации морских нефтяных месторождений, особенно в условиях ограниченной мобильности и воздействия внешних факторов.

Вследствие этого возникают сложности, связанные с реологическими характеристиками добываемых продуктов. АСПО в составе нефти существенно изменяют её реологические свойства, ухудшая её текучесть и влияя на процесс транспортировки. Для успешного решения этой проблемы необходимо учитывать особенности движения твердых частиц, капель и пузырей в потоке, а также процессы разделения,

расслоения и классификации нефтяных систем, как в горизонтальных, так и в вертикальных потоках.

Кроме того, сложность транспортировки и сбора продукции усиливается рельефными условиями морских месторождений, где добывающие скважины и пункты сбора продукции расположены на различных платформах, а транспортные коллекторы часто проходят через подводные участки, что создаёт дополнительные механические и гидродинамические трудности. Такие особенности увеличивают сложность проектирования и эксплуатации системы трубопроводов и сбора продукции, влияя на параметры массо- и теплопереноса и гидродинамику течения.

Эти проблемы непосредственно влияют на эффективность процесса добычи и транспортировки нефти и газа. Следовательно, для повышения эффективности этих процессов необходимо разработать комплексные решения, учитывающие специфику реологических характеристик, а также особенности морских условий и технологии транспортировки.

В связи с вышеизложенными проблемами, актуальной задачей становится разработка научных основ и практических рекомендаций для повышения эффективности технологических процессов добычи, сбора и транспортировки нефти и газа, особенно с учетом сложности работы с трудноизвлекаемыми и высоковязкими нефтями, а также создания новых методов для улучшения реологических свойств нефтяных потоков.

**Объектом исследований** являются сложные реофизические системы и процессы, происходящие в них. Исследуются особенности поведения структурированных нефтей, содержащих значительное количество смол, асфальтенов и парафинов, которые описываются математическими моделями в виде линейных и нелинейных дифференциальных уравнений.

**Предмет исследования** - проблемы, возникающие при добыче и транспортировке этих сложных реофизических систем, а также задачи, связанные с изучением их реологических свойств и повышением уровня извлечения ресурсов сырой нефти.

**Цель работы** - разработка научных основ для повышения эффективности технологических процессов добычи и

транспортировки сложных реофизических систем путем построения математических моделей процессов фильтрации и структурообразования нефтей в пластовых системах нефтяных месторождений и исследования реологических особенностей структурированных нефтей.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ и обобщение опыта в области повышения уровня извлечения ресурсов сырой нефти. Оценка и выбор наиболее значимых параметров нефтяной залежи (НЗ), а также построение соответствующих математических моделей для описания процессов добычи.

2. Исследование проблем транспортировки нефти и нефтепродуктов, связанных с их реологическими свойствами. Разработка эффективных методов транспортировки нефтяной эмульсии (НЭ) по трубопроводам до установок подготовки нефти, что требует создания математических моделей для расчета характеристик потока НЭ.

3. Создание математических моделей для оценки состояния нефтегазодобычи и разработки методов оценки эффективности эксплуатации месторождений.

4. Исследование процессов фильтрации нефти в пористых средах с помощью математического моделирования. Разработка модели уплотнения нефтяного пласта, связанного с осаждением примесей и асфальтосмолистых веществ на поверхности пор, а также нестационарной фильтрации для неньютоновских нефтей. Определение фильтрационных свойств нефтяных пластов и разработка технологий очистки сточных нефтяных вод от асфальтенов.

5. Исследование нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах, зависимость этих нелинейностей от числа Рейнольдса и разработка моделей их описания для различных областей изменения числа Дарси.

6. Математическое моделирование процессов, происходящих в промежуточном эмульсионном слое отстойного аппарата. Исследование физико-химической адсорбции природных

эмульгаторов на поверхности эмульгированной водяной капли, смачивания бронирующих оболочек, образования двойного электрического слоя на поверхности эмульгированной водяной капли и механических примесей. Построение математических моделей процессов образования и разрушения нефтяной эмульсии.

7.Разработка диффузионной модели кристаллизации парафинов из нефти и осаждения асфальтосмолистых веществ на стенках трубопроводов. Изучение диффузионно-миграционных и кристаллизационных процессов, а также влияние толщины отложений на гидродинамические и тепло-массообменные параметры.

8.Исследование основных параметров структурированных нефтей для создания моделей, описывающих их поведение. Разработка моделей для расчета вязкости реологических дисперсных систем с учетом структурообразования.

**Методы исследования.** В рассматриваемой работе поставленные задачи были решены с помощью применения структурно-системного анализа процессов расслоения и осаждения частиц в суспензиях и эмульсиях, методов гидродинамики и массопереноса в дисперсных средах, реологии структурированных нефтяных дисперсных систем и моделирования физико-химических явлений в процессах разделения нефтяных эмульсий.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

- 1.Реофизические особенности структурированных нефтей.
- 2.Оценка состояния нефтяной залежи.
- 3.Моделирование процессов фильтрации и структурообразования нефти в пористых средах с учетом осаждения асфальтенов и нестационарности фильтрации нефти.
- 4.Математические модели образования и разрушения нефтяной эмульсии, определение частоты столкновения частиц в полидисперсных системах с учетом влияния физических полей и термодинамических систем на свойства водонефтяных эмульсий.
- 5.Исследование осаждения асфальто-смолистых веществ на стенках труб транспортировки на основе диффузионно-

миграционных, кристаллизационных, а также кинетических и динамических процессов образования и осаждения твердой фазы при движении потока нефти.

6. Результаты исследования основных параметров структурированных нефтей, на основе которых созданы реологические модели, носящие полуэмпирический характер и удовлетворительно описывающие экспериментальные данные.

### **Научная новизна исследования**

1. Разработаны новые математические модели процессов фильтрации и структурообразования нефтей в пластовых системах, которые описывают динамику изменения вязкости нефти в зависимости от времени её прохождения через зазор. Эти модели имеют экспоненциальный характер и могут быть использованы для решения задач повышения извлечения углеводородных ресурсов.

2. Создана модель для определения частоты столкновений частиц с учётом функции распределения их размеров. Это позволяет учесть влияние распределения дисперсной фазы на частоты столкновений, что имеет важное значение для моделирования процессов в нефтяных системах.

3. Разработаны модели, которые описывают процессы коалесценции и дробления капель воды в нефтяной эмульсии при турбулентном потоке. Эти модели позволяют интерпретировать изменения размеров капель и их влияние на процесс разделения жидких фаз «нефть-вода».

4. Решены задачи фильтрации нефти в пористой среде, выявлено, что асфальтены, образующие коагуляционные структуры в виде агрегатов и кластеров, существенно влияют на реологические свойства нефти. Осаждение асфальтенов на поверхности пористой среды изменяет её пористость, что приводит к пульсационному затуханию дебита скважины и уплотнению структуры.

5. На основе анализа растворимости асфальтенов в различных ароматических углеводородах предложено решение важной экологической задачи - создание технологии очистки и разделения сточных вод от асфальтенов и твёрдых частиц.

Используя явления коалесценции и дробления, массопереноса в системах «жидкость-жидкость» и экспериментальные исследования, предложена технология жидкофазной экстракции.

6. Предложено решение уравнения нестационарной фильтрации нефти в пористой среде для ограниченной области. Разработаны алгоритмы для оценки коэффициентов пьезопроводности и проницаемости пористой среды, что позволяет более точно моделировать процессы фильтрации в условиях добычи нефти.

7. Разработаны математические модели, описывающие механизмы осаждения частиц из дисперсного потока. Сравнение этих моделей с экспериментальными данными показало, что образование плотных слоёв частиц на стенках труб существенно влияет на явления переноса массы и тепла.

8. Построена кинетическая модель растворения асфальтосмолистых веществ в ароматических растворителях, зависящая от температуры. Модель основана на массопереносе в условиях изотропной турбулентности и в пределах пограничного слоя, что позволило определить кинетические зависимости и коэффициенты растворения для различных типов распределения концентрации растворённого вещества.

9. Предложено обобщённое уравнение для вычисления вязкости структурированных дисперсных систем с учётом их реологических свойств. Выявлены особенности кривой вязкости на начальных этапах структурообразования, что позволяет более точно моделировать поведение нефтяных систем с различной дисперсией частиц.

10. Разработана модель, описывающая зависимость вязкости от объёмной доли частиц. На основе этой модели сделан вывод, что при медленной коагуляции частиц эффективная вязкость дисперсной системы зависит от времени коагуляции, что имеет практическое значение для процессов добычи и транспортировки нефти.

11. Построены модели, позволяющие оценить изменения размеров и массы наноагрегатов во времени, учитывая молекулярную и турбулентную диффузию частиц асфальтенов.



Также предложены модели фильтрации и реологии на основе решения уравнения Максвелла для вязкоупругих жидкостей. Получены выражения для оценки эффективной вязкости нефти и её подвижности в зависимости от температуры.

### **Теоретическое и практическое значение исследований**

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы специалистами, занимающимися вопросами гидродинамики и массопереноса в структурированных нефтяных дисперсных системах, а также фильтрации нефтей в пористых средах при

- проведении структурно-системного анализа основных явлений, протекающих в дисперсных средах;
- решении вопросов диффузионного осаждения частиц асфальтенов в порах и трубах, а также на поверхности капель воды в нефтяных эмульсиях;
- подходе к агрегативно и седиментационно-неустойчивым системам, турбулентным течениям в трубах, структурообразованию в среде и эволюции распределения частиц по времени;
- решении задач реологии неньютоновских нефтей и моделирования процессов разделения нефтяных эмульсий.

Предлагаемые в диссертационной работе научные положения могут быть использованы при повышении эффективности технологических процессов добычи и транспорта сложных реофизических систем. Результаты, полученные в диссертационной работе, в основном, нашли свое отражение в монографии - Г. И. Келбалиева, С. Р. Расулова, Д. Б. Тагиева и Г.Р. Мустафаевой - «Механика и реология нефтяных дисперсных систем», г. Москва, издательство Маска, 2017. - 462с. На основе книги Казанским федеральным университетом разработана программа дисциплины «Основы реологического анализа нефтяных дисперсных систем» в рамках направления подготовки магистров специальности «Нефтегазовое дело», в которой базовым учебным пособием стала указанная монография.

**Апробация и внедрение.** Основные результаты диссертации

были доложены и обсуждены на следующих международных конференциях:

-на международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде, (г. Уфа, 2016, с.295-297);

-на Международной научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, (г. Альметьевск, 2016, с.40-43);

-на Международной конференции «Рассохинские чтения», (г. Ухта, 2017, часть 1, с.231-234);

- на научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (г. Ухта, 2021, с.149-153).

Научно-исследовательским и проектным институтом Нефти и Газа SOCAR была выдана справка, утверждающая, что результаты, полученные в данной диссертационной работе, признаны целесообразными для использования при расчете и проектировании технологических процессов нефтегазового комплекса.

**Публикация научных работ.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 35 научных работах, из них 10 статей в журналах, входящих в международную базу Web of Science и Scopus и одна монография в городе Москве.

**Название организации, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа была выполнена в Научно-исследовательском и проектном институте «Нефтегаз» SOCAR.

**Общий объем диссертации с учетом объемов отдельных структурных разделов.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных результатов и списка использованной литературы, включающей 283 издания. Диссертация включая таблицы, рисунки и список литературы, прокомментирована на 407 страницах. Введение состоит из 14008 знаков, I глава из 81065 знаков, II глава 24398 знаков, III глава 59351 знаков, IV глава 96927 знаков, V глава 65037 знаков, VI глава 63250 знаков. Общий объем диссертаций составляет 408811 знаков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования. Указаны основные пункты, подлежащие защите, а также предмет, объект и методы исследования, объём и структура работы, её апробация, краткое содержание глав и области применения полученных результатов.

**Первая глава** посвящена анализу состояния и проблем добычи, сбора и транспортировки сложных гетерогенных продукций из скважин в морских условиях. Рассмотрены проблемы, возникающие при добыче, сборе и транспортировке этих реофизических систем. На основе проведённого анализа определены задачи, а также показана необходимость разработки математических моделей для описания процессов, протекающих в реофизических системах.

Актуальность проблемы в нефтегазовой отрасли Азербайджана заключается в том, что большая часть месторождений находится на поздней стадии разработки, характеризуется высокой обводнённостью и низкими показателями добычи. Это требует поиска эффективных решений для повышения нефтеотдачи пластов и улучшения технологических процессов.

В работе представлен обзор исследований, касающихся разработки нефтяных месторождений как в Азербайджане, так и за рубежом, а также методов воздействия на нефтеносные пласты. Выявлено, что нефти, содержащие активные компоненты, при низких температурах в динамических условиях обладают структурно-механическими свойствами, что приводит к снижению эффективности заводнения нефтяных месторождений холодной водой. Особое внимание уделено тому, что при применении заводнения на процесс разработки и извлечения нефти из недр оказывают влияние геолого-физические параметры, которые определяют реологические свойства пластовых нефтей, коллекторские свойства и неоднородность пластов. Это

подчеркивает необходимость усовершенствования методов заводнения для повышения эффективности разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти.

Далее рассмотрены физико-химические методы воздействия на пласты, разработанные для повышения нефтевымывающей способности закачиваемой воды. Эти методы применяются в процессе разработки нефтегазовых месторождений как третичные методы, а также для улучшения нефтеотдачи пластов при воздействии рабочих агентов (вода, газ) на разных этапах разработки месторождения. Важно отметить, что эти методы могут быть использованы как на начальных, так и на поздних стадиях разработки.

При анализе работ было установлено, что в подавляющем большинстве исследованных месторождений из-за превышения вязкости нефти по сравнению с вязкостью воды и неоднородности коллектора происходит раннее обводнение продуктивных скважин, что в свою очередь приводит к низкому коэффициенту нефтеотдачи. В связи с этим, физико-химические методы воздействия на пласты направлены на контроль подвижности нефти и воды, а также на управление их реологическими свойствами и взаимодействием с поверхностью породы.

В рамках работы проведён анализ методов разработки нефтяных месторождений, направленных на повышение уровня извлечения ресурсов нефти. Первым рассмотренным методом является технология закачивания воды с контролируемой минерализацией, которая относится к третичным методам повышения нефтеотдачи. Этот метод позволяет увеличить нефтеотдачу за счет гидрофилизации породы. Для изучения минерального состава горных пород, составляющих пласт, был проведён обширный спектр лабораторных исследований ядерного материала. Минеральный состав глин был определён методом рентгеноструктурного анализа, при котором не были выявлены минералы, вызывающие разбухание глины при контакте с водой. Однако, необходимо отметить, что этот метод имеет несколько недостатков. Среди них - высокие затраты, снижение эффективности со временем в результате истощения пласта, риск

засорения пласта, негативное воздействие на окружающую среду при подземном водоснабжении, а также возможность сейсмических событий и геологических изменений, возникающих в результате дополнительного давления.

Ко второму методу относятся новые эффективные комбинированные и термические технологии воздействия на сложные карбонатные пласты с трудноизвлекаемыми запасами высоковязкой нефти. Эти методы не имеют аналогов в мировой практике добычи нефти и уже прошли промышленную реализацию. К ним можно отнести следующие подходы:

- увеличение нефтеотдачи с помощью жидкофазного окисления;
- воздействие на залежи вязкой нефти термополимерами;
- импульсно-дозированное тепловое воздействие на пласт;
- комбинированное теплоциклическое воздействие с использованием нагнетательных систем;
- циклические внутрипластовые термические воздействия.

Однако, данные методы также имеют ряд недостатков, включая:

- повышение температуры в пласте, что может привести к деформации и разрушению горных пород, затрудняя добычу нефти и газа;
- выбросы пара, способствующие загрязнению окружающей среды и вызывающие экологические проблемы;
- высокие энергетические затраты, что повышает стоимость нефте- и газодобычи;
- образование отложений продуктов реакции, что приводит к забиванию скважины и снижению производительности пласта.

В работе также анализируются комбинированные способы воздействия на нефтяные пласты, одним из которых является универсальный метод повышения нефтеотдачи с применением поверхностно-активных веществ. Этот метод может быть эффективно использован на начальном этапе усиливающегося обводнения продукции. Были рассмотрены проекты, использующие эти методы.

В зарубежной практике широко применяют методы, основанные на использовании полимеров, так как эти вещества очень чувствительны к содержанию солей, что резко снижает вязкость нефти. В качестве решения возникших проблем было предложено использовать неионогенные поверхностно-активные вещества.

Метод с применением поверхностно-активных веществ имеет свои достоинства и недостатки. К преимуществам относится:

- сохранение коллекторских свойств пластов;
- отсутствие негативного влияния на подготовку и транспортировку нефти;
- снижение поверхностного натяжения на границе «нефть-вода», что облегчает проходимость нефти.

Однако метод имеет и недостатки, такие как:

- масштабная адсорбция полимеров;
- несмешиваемость полимерного раствора с нефтью, что снижает эффективность вытеснения.

При транспортировке нефти и нефтепродуктов возникают проблемы, связанные с их реологическими свойствами. Для решения этих проблем необходимо учитывать закономерности движения твердых частиц, капель и пузырей в потоке, а также процессы разделения, расслоения и классификацию нефтяных систем.

Причины возникновения данных явлений можно условно разделить на несколько факторов:

1. Нефтяные системы имеют сложную гидродинамическую структуру, включающую различные направления потока, а также физические взаимодействия как гидродинамической, так и не гидродинамической природы.

2. В дисперсных средах между частицами дисперсной фазы происходят разнообразные взаимодействия, такие как коагуляция, агломерация, дробление, а также взаимодействия с поверхностями (эффект стенки) и с несущей фазой. Эти процессы сопровождаются столкновениями частиц, их деформацией, разрушением структуры и истиранием. Интенсивность этих

явлений усиливается при высоком уровне турбулентности потока и высокой плотности частиц.

3. При высокой плотности частиц в потоке происходит деформация гидродинамических полей частиц из-за их взаимного воздействия. Это ограничивает движение частиц, что ведет к коагуляции, дроблению и другим физическим процессам.

4. Вязкость, плотность, поверхностное натяжение компонентов дисперсной фазы, а также физико-химические процессы, такие как растворение, испарение, сублимация и конденсация, существенно влияют на поведение частиц в системе.

5. В вертикальных и горизонтальных каналах происходит диффузионный перенос частиц и их осаждение в турбулентном потоке.

6. Процесс преобразования и рассеивания параметров частиц, колебания концентраций и направления частиц приводят к стохастической природе полидисперсной системы.

7. Сдвиговая вязкость — это свойство, определяющее способность жидкости деформироваться под действием сдвигающих сил. Высокая сдвиговая вязкость может вызвать трудности при прохождении через узкие каналы или при смешивании с другими жидкостями.

8. Температурные условия. Реологические свойства нефти и нефтепродуктов изменяются в зависимости от температуры. При низких температурах возможны проблемы с замерзанием, что затрудняет транспортировку и может привести к засорам в трубопроводах.

Из вышеизложенного следует, что для решения данной проблемы необходимо комплексное исследование всех процессов, связанных с миграцией частиц, их осаждением и разделением.

В работе представлен обзор множества выражений для расчета коэффициента турбулентной диффузии частиц с учетом динамической скорости и скорости осаждения, а также проведен анализ механизма седиментации в реофизических системах. Приведены обширные экспериментальные данные для определения скорости осаждения твердых частиц различных типов из потока. Между экспериментальными и расчетными

данными по скорости осаждения наблюдается несоответствие, которое зависит от плотности частиц - чем выше плотность, тем больше разница.

Обзор проведенных исследований показывает:

1.Существование множества экспериментальных исследований и формул, описывающих их, усложняет создание единой формулы для вычисления скорости осаждения и всплытия частиц, за исключением стоксовых частиц. Это связано с изменчивостью размеров и формы частиц, обтеканием их потоком, физическими явлениями и зависимостью коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

2.Колебания концентрации частиц, их распределение в неоднородных полях, флуктуации поперечной скорости и диссипации энергии приводят к стохастическим процессам осаждения. Для решения данной проблемы требуется использование специализированного эмпирического подхода.

3.Исследование процессов оседания частиц в изотропном турбулентном потоке для различных масштабов турбулентности в трубах и каналах позволило выделить ключевые характеристики турбулентности, влияющие на скорость осаждения: удельную диссипацию энергии, масштаб турбулентности и вязкость среды.

4.Изменение размеров частиц приводит к ограничениям в процессе осаждения, что вызывает частые столкновения и взаимодействия между частицами. В результате этих процессов происходит коагуляция, деформация формы частиц, их разрушение и дробление, что ведет к осаждению полидисперсных частиц.

5.На современном этапе развития нефтедобычи не существует универсального метода увеличения нефтеотдачи, который мог бы быть применим ко всем месторождениям. Это обусловлено различиями в коллекторских, физико-химических свойствах пласта на разных месторождениях. Поэтому, для повышения нефтеотдачи необходимо индивидуально разрабатывать и подбирать технологию воздействия для каждого конкретного месторождения.



На основе проведенного аналитического обзора вытекает необходимость решения ряда важных задач, таких как:

- Разработка методов оценки состояния нефтегазодобычи с использованием математического моделирования.

- Математическое моделирование процессов фильтрации нефти в пористых средах.

- Моделирование процессов образования и разрушения нефтяных эмульсий.

- Исследование диффузионно-миграционных и кристаллизационных процессов при осаждении асфальтосмолистых веществ на стенках труб при транспортировке.

- Исследование реологических характеристик структурированных нефтей и разработка соответствующих моделей.

**Вторая глава** посвящена разработке метода оценки состояния нефтяной залежи, который представляет собой важную производственную задачу.

Одной из актуальных проблем разработки нефтяных месторождений является увеличение нефтеотдачи пластов. Низкий коэффициент извлечения нефти из пласта в значительной степени связан с молекулярно-поверхностными процессами, происходящими на границе раздела нефть-породообразующие минералы и погребенная вода. Это связано с наличием гидрофобных участков пласта, которые вступают в прямой контакт с нефтью, если принять во внимание, что значительная часть остаточной нефти находится в пласте в гранично-связанном состоянии.

Исходя из роли ионообменных процессов и нанотерапии асфальтенов, эти факторы необходимо учитывать при разработке математических моделей процессов нефтяной залежи. Это поможет интенсифицировать добычу нефти и повысить нефтеотдачу пластов, находящихся на поздних стадиях разработки.

Создание адекватных математических моделей для описания процессов в нефтяной залежи требует комплексного подхода,

включающего системный анализ процессов в недрах и выбор ключевых параметров, которые необходимо учитывать в модели. В рамках данного подхода была предложена обобщенная структурная схема, отражающая основные показатели и параметры процессов нефтедобычи.

На основе этой схемы разработана методика<sup>1</sup>, использующая модификацию кинетического уравнения Колмогорова-Ерофеева. Данная методика впервые позволяет применять фундаментальные математические подходы для количественной оценки состояния нефтяных залежей. Её ключевой особенностью является возможность определения коэффициентов модели с использованием аналитического решения уравнений в начальных условиях. Это делает методику практичной для прогнозирования изменения текущего отбора нефти и оценки перспективных характеристик залежей, что ранее было недоступно при использовании классических моделей, таких как уравнение Арпса. Таким образом, предложенный подход обеспечивает новую перспективу для анализа и управления процессами нефтедобычи.

Рассмотрена проблема увеличения вязкости нефти (нефтяной эмульсии) и, соответственно, гидравлического сопротивления (силы трения), возникающего при движении флюидов в насосно-компрессорной трубе.

Проведен системный анализ современного состояния процессов теплопередачи в горизонтальных трубопроводах и стволе нефтяных скважин. Выделены недостатки существующих подходов к математическому моделированию процесса передачи тепла от восходящего потока флюидов к горной породе.

При движении пластовых флюидов (нефти, газа и воды) в подъемной насосно-компрессорной трубе от забоя до устья нефтедобывающей скважины происходит постепенное снижение температуры потока, что ведет к увеличению вязкости нефти и, соответственно, повышению гидравлического сопротивления (силы трения) при движении флюидов в трубе.

---

<sup>1</sup> Рзаев, Аб.Г. С. Р. Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] Разработка метода оценки состояния нефтяной залежи // Нефтепромысловое дело, 2015. №5, - с. 21–23.

Снижение температуры потока особенно проблематично для высоковязких нефтей, содержащих тугоплавкие парафины и структурированные асфальтены (в виде кластеров), так как это приводит не только к повышению вязкостного сопротивления потоку, но и к отложению этих компонентов на внутренней поверхности насосно-компрессорной трубы, что создает дополнительные проблемы в работе глубинного насоса.

Множество работ посвящено решению данной проблемы, и они внесли значительный вклад в её изучение. Однако, в этих исследованиях не учитывается влияние теплопроводности водонефтяного слоя и газовой шапки, которые находятся в пространстве между насосно-компрессорной трубой и обсадной колонной, а их теплопроводность значительно ниже, чем у углеродистой стали. Эти факторы учтены в работах, где разработан косвенный метод определения дебита нефтедобывающей скважины по термограмме, полученной на выкидной линии скважины. Однако, в этих работах не разработана математическая модель теплопередачи от восходящего потока флюидов к горным породам через несколько слоев с различными теплопроводностями. Кроме того, в некоторых исследованиях не учитываются изменения массового потока и температуры флюидов, а также температуры окружающей среды (горной породы) по высоте насосно-компрессорной трубы. Не принимается во внимание влияние слоя жидкости и газа в межтрубном пространстве, образуемом между насосно-компрессорной трубой и обсадной колонной.

В работе предлагается комплексный подход и новая математическая модель <sup>2</sup> для определения теплопередачи от восходящего потока флюидов в насосно-компрессорной трубе нефтедобывающей скважины к окружающей горной породе, что устраняет ранее обозначенные недостатки. Вначале используется эмпирический закон Фурье и эмпирическая формула охлаждения

---

<sup>2</sup> Гулуев, Г.А. Математическое моделирование процесса теплопередачи в стволе нефтяных скважин / Г.А. Гулуев, Аб.Г.Рзаев, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2015. №1, - с. 44-47.

Ньютона. Далее выводится окончательная математическая модель процесса теплопередачи от восходящего потока флюидов в подъемной трубе нефтедобывающей скважины к окружающей горной породе как

$$\frac{1}{\lambda_{\phi}} \ln r_{\text{в}} + \frac{1}{\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{r_{\text{н}} R_{\text{н}}}{r_{\text{в}} R_{\text{в}}} + \left( \frac{\ell}{H \lambda_{\text{ж}}} + \frac{\ell}{((\ell - H) \lambda_{\text{г}})} \right) \ln \frac{R_{\text{в}}}{r_{\text{н}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{п}}} \ln \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{н}}} = \frac{2\pi f t [t_{\phi}(z) - (t_3 - q_z)]}{Q(z)} \quad (1)$$

где  $t_{\phi}(z) = t_3 - b(1 - e^{-az})$ ;  $a = \frac{\pi D \lambda_{\text{ст}}}{Q^* \rho C}$ ,  $b = \frac{Q \rho i}{\pi \lambda_{\text{ст}} D E}$ ,  $i = \lambda^* \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$ ,  $\lambda^*$  - коэффициент гидродинамического сопротивления;  $t_3$  - температура потока флюидов в забое скважин;  $R_{\text{к}}$  - радиус контура питания;  $D$  - диаметр насосно-компрессорной трубы;  $Q^*$  - расход флюидов в насосно-компрессорной трубе;  $\rho$  - плотность ПФ;  $C$  - удельная теплоемкость флюидов;  $E$  - механический эквивалент тепла;  $i$  - гидравлический уклон (безразмерный);  $v$  - скорость потока флюидов в стволе скважин;  $g$  - ускорение свободного падения;  $t_{\phi}$  - температура флюидов;  $\lambda_{\phi}, \lambda_{\text{ст}}, \lambda_{\text{ж}}, \lambda_{\text{г}}, \lambda_{\text{п}}$  - теплопроводность флюида, жидкости, газа, породы и стенок насосно-компрессорной трубы и обсадной колонны, соответственно;  $z$  - вертикальная координата;  $\ell$  - длина стенки цилиндра;  $Q$  - количество передаваемого тепла;  $R_{\text{в}}, R_{\text{н}}$  - внутренний и внешний радиус обсадной колонны;  $r_{\text{в}}, r_{\text{н}}$  - внутренний и внешний радиусы стенки насосно-компрессорной трубы.

Предложенная математическая модель учитывает геометрический градиент горной породы и изменение температуры от забоя до выкидной линии нефтедобывающей скважины. Также учитывается содержание жидкости в межтрубном пространстве, образованном между насосно-компрессорной трубой и обсадной колонной, а также их теплопроводности.

Модель описывает процесс передачи тепла от восходящего потока флюидов через насосно-компрессорную трубу нефтедобывающей скважины к окружающей обсадной колонне.

**В третьей главе** приведены результаты математического моделирования процессов фильтрации и структурообразования нефтей в пластовых системах нефтяных месторождений.

Целью данного исследования стали:

- Разработка реологической модели уплотнения и нестационарной фильтрации для неньютоновских нефтей, моделирование затухания скорости фильтрации;
- Определение фильтрационных свойств нефтяного пласта;
- Исследование нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах в зависимости от числа Рейнольдса и разработка моделей их описания для различных областей изменения числа Дарси.

В работе проведены исследования процессов, происходящих на границе раздела жидкости и газа с породообразующими минералами.

Установлено, что одной из причин низкой извлекаемости нефти из пласта считается молекулярно-поверхностные процессы, происходящие на границе раздела нефти, породообразующих минералов и погребенной воды. Распределение гидрофильных и гидрофобных участков, их количество и чередование определяются природой породообразующих минералов, физико-химическими свойствами насыщающих пласт жидкостей и содержанием погребенной воды.

Следует отметить, что значительная часть поровых каналов (65-85%) обладает гидрофобными свойствами и гидрофобизована нефтью и газом. С учетом указанных особенностей процесс структурообразования нефти в капиллярах пласта-коллектора был описан через изменение вязкости во времени. Это изменение вязкости, в свою очередь, оказывает влияние на гидродинамические характеристики потока нефти и нефтяных эмульсий, что играет важную роль в процессе их транспортировки.

Таким образом, рациональный подход к транспортировке добываемой нефтяной эмульсии по трубопроводам до установки подготовки нефти требует разработки математических моделей, учитывающих особенности структуры и реологических свойств нефти как неньютоновской жидкости. Экспериментальные данные

зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига берутся из литературных источников, и для описания этого процесса предлагается экспоненциальный закон<sup>3</sup>

$$\tau = A \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}}{\lambda}\right) \right] + B, \quad (2)$$

Где  $\tau$  -напряжение трения (сдвига);  $A$ ,  $B$  и  $\lambda$  - экспериментальные коэффициенты,  $\dot{\gamma}$ - скорость сдвига.

Формула (2) описывает экспериментальные данные и может быть использована для моделирования поведения аномальных нефтей и нефтяных эмульсий с неньютоновским характером течения.

Течение неньютоновских нефтей в пористых средах характеризуется осаждением асфальтосмолистых и парафинистых соединений, а также твердых частиц, содержащихся в сырой нефти, в порах, что существенно влияет на пористость среды. Осаждение асфальтенов является серьезной проблемой во всех областях нефтяной промышленности: добыче, сборе, транспортировке, подготовке и переработке нефти.

Механизм образования плотного слоя на поверхности раздела фаз "жидкость-твердое тело" имеет весьма сложный характер и определяется множеством факторов, включая наличие пограничного слоя на поверхности раздела жидкость-твердая стенка, диффузионный и турбулентный перенос частиц асфальтенов к поверхности раздела, температурный режим в пограничном слое и на стенке трубы и т. д.

Следует отметить, что осаждение частиц происходит по миграционно-диффузионному и миграционно-гравитационному механизмам (в вертикальных и горизонтальных трубах).

Очевидно, что процесс осаждения асфальтенов на поверхности является массообменным процессом, при этом

---

<sup>3</sup> Расулов, С.Р. Математическое моделирование процесса структурообразования нефти в пласте-коллекторе нефтяных месторождений / С. Р. Расулов, Аб. Г. Рзаев, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2016, №3, - с.98-101.

скорость массопереноса определяется суммарной молекулярной и турбулентной диффузией, усложненной гравитационным осаждением в наклонных и горизонтальных трубах. Кроме того, массообменным процессом является коагуляция частиц асфальтенов при их столкновении, в результате чего образуются наноагрегаты, кластеры, а также их разрушение и дробление, что существенно влияет на течение структурированной нефти.

Миграционно-диффузионный механизм осаждения асфальтосмолистых частиц сопровождает все процессы осаждения, включая те, что происходят в пористом пласте, а также процессы разделения нефтяной эмульсии и другие. Осаждение асфальтенов в порах пласта приводит к изменению его пористости, что, в свою очередь, ведет к уплотнению пористой структуры, закупорке и отложению различных примесей, содержащихся в нефти (асфальтены, смолы, твердая фаза).

В работе<sup>4</sup> рассматривается проблема уплотнения пористой среды в результате ее сжатия и деформации под действием внешних деформирующих напряжений, например, массовых сил вышележащих слоев, а также закупорки пор за счет отложения асфальтосмолистых веществ и мелкодисперсной твердой фазы на внутренней поверхности пор.

В данном исследовании моделируется затухание процесса фильтрации в результате изменения пористости пласта во времени для ламинарного и турбулентного течения жидкости в порах.

Отмечено, что при турбулентном течении жидкости в порах затухание процесса фильтрации в пористой среде происходит быстрее, чем при ламинарном. Загрязнение нефтяного пласта напрямую влияет на изменение его пористости, от которой зависят гидродинамические свойства и дебит скважины. В работе предложена методика, учитывающая эту зависимость, для вычисления изменения дебита скважины.

---

<sup>4</sup> Келбалиев, И.Г. Моделирование фильтрации нефтей в пористой среде и технология жидкофазной экстракции асфальтенов / Г.И. Келбалиев, С.Р. Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Теоретические основы химической технологии, 2016. Т.50, №6, - с.673-682.

На основе литературных данных была использована формула, в которой коэффициент проницаемости определяется как сложная функция пористости.

Уравнение Козени-Кармана уточнило, что проницаемость пористой среды зависит от площади поверхности частиц, коэффициента извилистости и формы пор. Таким образом, разработанная модель связывает изменения дебита скважины с пористостью и временем, что делает её практическим инструментом для оценки фильтрационных процессов в реальных пластах.

Многочисленные исследования и экспериментальные данные, полученные в ходе эксплуатации реальной скважины для добычи азербайджанских нефтей, показали, что изменения дебита скважины во времени могут иметь пульсационный затухающий характер.

В работе рассмотрено решение уравнения нестационарной фильтрации нефти в пористой среде для ограниченной области. На основе этого решения разработаны алгоритмы оценки коэффициентов пьезопроводности и проницаемости пористой среды, представленные ниже

$$\chi = -\frac{0,1729\varepsilon R_k^2}{t} \ln \frac{0,626(P_k - P)}{P_k - P_c}. \quad (3)$$

$$k = \chi \eta_c \beta^*. \quad (4)$$

Здесь  $t$ -время;  $P, P_k, P_c$ -соответственно давление, контурное давление, забойное давление;  $R_k^2$ -радиус контура пласта;  $\beta^*$  - приведенный коэффициент упругоёмкости пласта,  $\eta_c$  - динамическая вязкость нефти.

Для более глубокого анализа процессов фильтрации предложены критерии подобия пористой среды, такие как число  $Kr = \frac{V_0 R_k}{\chi} = ReQ_k$ , где  $Kr$  характеризует отношение конвективного переноса к переносу импульса пьезопроводностью и аналогично числу Пекле для массопереноса и теплопереноса.

Дополнительно введён критерий  $Q_k = \frac{V_s}{\chi}$ , аналогичный числу Прандтля для теплопереноса и числу Шмидта для массопереноса,



который отражает физические свойства пористой среды. Сравнение предложенных моделей с экспериментальными данными показало их высокую точность и хорошую сходимость расчетов с реальными результатами.

На закономерности фильтрации жидкостей и газов в пористой среде влияют не только границы раздела между нефтью, газом и водой, но и поверхностные явления, происходящие на границах твердых тел и жидкости. Эти явления существенно влияют на линейный характер закона фильтрации в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса.

В работе<sup>5</sup> провели исследование нелинейностей уравнений фильтрации нефти в пористых средах и разработали модели их описания для различных областей изменения числа Дарси. Нелинейности фильтрации обусловлены сложностью структуры пористой среды, анизотропией её свойств и характером течения.

В реальных коллекторах нефти и газа анизотропия может быть связана с трещиноватостью, слоистостью и случайными изменениями порового пространства. Это требует учёта различий фильтрационных свойств в трёх направлениях, что усложняет практическое решение уравнений Дарси из-за трудностей определения распределения проницаемости.

Даже при предположении изотропности среды, наличие вязкого и конвективного течений приводит к нелинейностям, что подчёркивает важность исследования данных процессов.

Многочисленные исследования, посвященные анализу пределов применимости закона Дарси, позволили выделить следующие критические границы:

- а) верхнюю границу, связанных с проявлением инерционных конвективных сил при достаточно высоких скоростях фильтрации;
- б) нижнюю границу, связанную с проявлением неньютоновских реологических свойств жидкости, ее

---

<sup>5</sup> Келбалиев, Г.И. Проблемы нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах / Г.И. Келбалиев, С.Р.Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Нефтепромысловое дело, 2015. №8, - с.23-26.

взаимодействием с твердым скелетом пористой среды при достаточно малых скоростях фильтрации и вязким течением.

Верхнюю и нижнюю границы применимости закона Дарси обычно связывают с некоторым критическим (предельным) значением числа Рейнольдса  $Re_{cr}$ .

Для общего описания числа Дарси в широкой области изменения числа Рейнольдса предложено полуэмпирическое выражение:

$$Da = 1 - \exp(-5 \times 10^6 Re^3) - 0,01Re \times (1 + 0,000122Re^2)^{-0,5} \quad (5)$$

Для вычисления числа Дарси во всех формулах используется выражение числа Рейнольдса в виде:

$$Re = \frac{Va}{(0,75\varepsilon + 0,23)v_c} \quad (6)$$

где  $V$ -скорость течения или фильтрации;  $a$ -характерный размер частиц;  $\varepsilon$ -пористость;  $v_c$ -кинематическая вязкость среды.

В данном исследовании рассматриваются вопросы описания процессов уплотнения нефтяного пласта, связанных с осаждением различных примесей и асфальтосмолистых веществ на внутренней поверхности пор. Уравнение изменения пористости построено на основе явлений массопереноса в ламинарном и турбулентном режимах. Затухание процесса фильтрации описано моделью, связанной с изменением коэффициента проницаемости и пористости слоя во времени. Приведенные сравнения расчетных значений изменения дебита с практическими данными показали удовлетворительное соответствие и выявили пульсационный затухающий характер зависимости скорости фильтрации от времени.

**Четвертая глава** посвящена моделированию процессов образования, разрушения и гидродинамических особенностей течения нефтяных эмульсий в сети трубопроводов морской нефтедобычи.

Механизму образования, стабилизации и разрушения нефтяных эмульсий, как гетерогенных сред, посвящено множество исследований. Однако, многие проблемы, связанные с явлениями,

происходящими на границе раздела нефть-вода, коалесценцией и дроблением капель воды, расслоением и осаждением, до сих пор не имеют корректных решений. Важными факторами, влияющими на эффективность разделения нефтяных эмульсий, являются условия утончения, разрыва межфазной пленки и скорость коалесценции, связанные с разрушением адсорбированной пленки асфальтосмолистых веществ на поверхности капель, а также участие деэмульгаторов в этом процессе.

С целью теоретического решения проблемы, связанной с течением суспензий и эмульсий, были выполнены некоторые упрощения реальной картины течения полидисперсной среды с частицами разного состава и размера. Системы дифференциальных уравнений, описывающие общие случаи движения суспензий и эмульсий, должны учитывать принципиальную разрывность среды, а также происходящие в ней физико-химические процессы переноса тепла и массы.

Предложено общее уравнение движения многофазных систем с определенными упрощениями и допущениями, которые облегчают решение задач гидродинамики как при турбулентном, так и при ламинарном течении. Также предложено дифференциальное уравнение движения отдельно взятой  $i$ -той сферической частицы в суспензии.

Проанализированы процессы, происходящие в многофазной системе, и сделан вывод о взаимном влиянии фаз, что приводит к изменению межфазного обмена. Рассмотрено движение тонкодисперсных суспензий в турбулентном потоке. Отмечено, что наличие частиц разного типа в жидкости усложняет решение задач гидромеханики как при турбулентном, так и при ламинарном течении.

Предложена формула для определения силы сопротивления твердой сферической частицы в окружающей жидкости

$$F_T = 6\pi\rho_c v_c a V_0. \quad (7)$$

где  $\rho_c$  -плотность среды;  $a$  -диаметр частиц;  $V_0$  -начальная скорость частицы.

Процесс разделения нефтяных эмульсий является важным этапом подготовки и очистки сырой нефти от воды, минеральных солей и различных сопутствующих примесей. В расчетах процессов и аппаратов химической технологии, таких как жидкостная экстракция, разделение неоднородных систем, реакции в системах нерастворимых жидкостей и других, возникает необходимость в определении кинетики (скорости) коагуляции диспергированных частиц. Несмотря на теоретическую значимость формул для расчета частоты столкновений капель и частиц в потоке, их использование для конкретных практических приложений представляет собой трудоемкую задачу.

С этой целью мы привели формулы различных авторов, которые пригодны только для описания частоты столкновений частиц в монодисперсных системах. Однако, реальные системы, включая нефтяные эмульсии, являются полидисперсными, и распределение диспергированных частиц по размерам имеет широкий спектр (размер наименьших частиц может быть примерно в 100 раз меньше размера средневесовых частиц). Это делает применение вышеупомянутых формул для расчета частоты столкновений дисперсных частиц в полидисперсных системах проблематичным, так как они могут привести к заниженным результатам.

Попытка решения этой проблемы была предпринята Гансом Мюллером, который, используя теорию Смолуховского и коэффициент, характеризующий вероятность столкновения двух частиц разного размера (функцию отношения их радиусов), вывел формулу, учитывающую только два спектра распределения. Однако, эта формула ограничена при применении, поскольку она дискретна (учитывается только два спектра распределения частиц) и, следовательно, является упрощенной для более сложных полидисперсных систем

$$\theta_{\Gamma} = 4\pi a D n \gamma_{ik} = \frac{4\pi a D n \left(1 + \frac{r_i}{r_k}\right)^2}{4 \frac{r_i}{r_k}}, \quad (8)$$

где  $r_i, r_k$  - соответственно средний радиус  $i$ -их и  $k$ -тых частиц;  $\theta_{\Gamma}$  - частота столкновений дисперсных частиц;  $D$  - коэффициент диффузии, который описывает скорость диффузии частиц в

среде;  $n$  -число частиц в единице объема;  $\gamma_{ik}$  -фактор, характеризующий вероятность столкновения двух частиц разной величины.

С целью устранения указанного недостатка (или усовершенствования формулы) предлагается вывод уравнения, которое учитывает влияние характеристик исходного распределения частиц по размерам на частоту их столкновений. Проведя теоретический анализ частоты столкновений капель в полидисперсных системах и принимая соответствующие допущения, мы получаем выражение для частоты столкновений частиц с учетом их начального распределения

$$\frac{\theta^x}{\theta} = \left[ \left( \frac{\sigma}{r_{cp}} \right)^2 + 1 \right]^3 = z^x, \quad (9)$$

где  $\theta^x$  -частота столкновения частиц с учетом их начального перераспределения;  $\theta$  -частота столкновения частиц в единицу времени,  $\sigma$  -радиус столкновений частиц;  $z^x$  -является коэффициентом полидисперсности и характеризует влияние характеристик исходного распределения частиц ( $r_{cp}$ ,  $\sigma$ ) на частоту столкновения.

Полученная формула <sup>6</sup> полностью учитывает влияние распределения дисперсной фазы по размерам диспергированных частиц на частоту их столкновений. По этой формуле видно, что с увеличением полидисперсности коллоидных систем частота столкновений  $z^x$  также увеличивается, и наоборот. Далее, в работе исследованы проблемы, лежащие в основе моделирования процессов разделения и расслоения нефтяной эмульсии, сопровождающихся коалесценцией и дроблением капель воды в турбулентном потоке. Рассмотрены влияния содержания асфальтосмолистых веществ на образование адсорбционных пленок на поверхности капель воды, а также их влияние на коалесценцию, дробление капель и эволюцию функции

---

<sup>6</sup> Рзаев, Аб.Г. Определение частоты столкновения частиц в полидисперсных системах / Аб.Г. Рзаев, С. Р. Расулов, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия», 2015. Т. XVI, - с.433-438.

распределения капель по размерам и времени. Анализ состава бронирующих оболочек на поверхности капель воды сырой нефти различных месторождений, способствующих стабилизации нефтяных эмульсий, показал, что основными стабилизаторами являются асфальтены и смолы, в состав которых входят высокоплавкие парафины и неорганические механические примеси. Был рассмотрен механизм образования адсорбционных пленок на поверхности капель, который включает стадии диффузионного переноса массы вещества (асфальтосмолистых веществ и твердой фазы) из объема нефти к поверхности капель воды, адсорбцию вещества на поверхности капель с образованием пленки, десорбцию и разрушение адсорбционного слоя с участием поверхностно-активных веществ.

Предложены уравнения для оценки эволюции числа капель и их размеров по времени, зависящие от частот дробления и коалесценции

$$N(t) = \frac{N_0 \exp(\omega_d t)}{1 + \frac{1}{2} \omega_k v N_0 t}. \quad (10)$$

где  $\omega_k$  и  $\omega_d$  - частоты коалесценции и дробления соответственно;  $v$  - текущий объем капли;  $N_0$  - начальное число капель в единице объема,  $(t)$  - время, которое влияет на изменение  $N(t)$ .

При  $\omega_k \gg \omega_d$  - преобладают процессы коалесценции

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + \omega_k v N_0 t}. \quad (11)$$

При  $\omega_d \gg \omega_k$  - преобладают процессы дробления

$$N(t) = N_0 \exp(\omega_d t) \quad (12)$$

Предложенные математические модели позволяют интерпретировать изменение размеров капель воды в нефтяной эмульсии, что сказывается на процессах разделения жидких фаз нефть-вода. Основными параметрами, влияющими на распределение капель воды и разделение фаз, являются физические свойства самой эмульсии (плотность, вязкость) и

параметры турбулентности (диссипация энергии, масштаб турбулентных пульсаций).

Интенсификация процессов разделения нефтяных эмульсий, в первую очередь, связана с турбулизацией потока в промежуточном слое, поскольку турбулентные пульсации скорости способствуют ослаблению межмолекулярных связей между адсорбированными компонентами бронирующих оболочек, их разрушению и снижению, а также увеличению частоты столкновений капель.

На сегодняшний день существует множество методов интенсификации процессов разделения нефтяных эмульсий, среди которых особое внимание следует уделить использованию постоянного электрического поля.

При рассмотрении процесса разделения нефтяных эмульсий с применением постоянного электрического поля было установлено, что в отличие от переменного электрического поля, смена полярности в постоянном поле не происходит. Поэтому, для разрушения токопроводящих цепочек необходимо применять специальные меры.

Для разделения нефтяных эмульсий постоянное электрическое поле используется в разбавленных системах с объемной долей воды менее 1-2%, т. е. в процессах переработки нефти, когда расстояния между отдельными каплями равны нескольким их диаметрам.

В таких условиях влияние местных электрических полей становится настолько незначительным, что вероятность образования токопроводящих цепочек между электродами стремится к нулю. Характерной особенностью поведения дисперсных систем в постоянном электрическом поле, даже если оно пространственное однородное (не градиентное), является то, что водяные капли дисперсной фазы имеют тенденцию к направленному движению в сторону одного из электродов. Это объясняется наличием электрокинетического потенциала, обусловленного двойным электрическим слоем.

На основании анализа нефтяных эмульсий и влияния физических полей на них выделены важные свойства процессов

коалесценции и дробления капель, такие как агрегативная неустойчивость, связанная с ней пространственная неоднородность, деформация и осаждение капель, зарождение новых частиц и другие факторы.

Показано, что в реальных условиях возможно существование квазиравновесного состояния между процессами коалесценции и дробления, что приводит к стационарным функциям распределения.

Эффективность подготовки нефти, включая обезвоживание и обессоливание, зависит от удаления бронирующих оболочек с эмульгированных водяных капель и их разделения на нефть и воду. Бронирующие оболочки, формируемые природными эмульгаторами, препятствуют слиянию капель, а их разрушение на молекулярном уровне (0,1-100 нм) является ключевым этапом. На устойчивость эмульсий влияют физико-химические свойства эмульгаторов, зарядовые взаимодействия, смачиваемость, температура, расход деэмульгаторов и свойства пластовой воды.

Промежуточный эмульсионный слой, расположенный между водяным и нефтяным слоями, выполняет важные технологические функции, способствуя коалесценции и фильтрации. Процессы образования и разрушения бронирующих оболочек зависят от адсорбции природных эмульгаторов, смачивания оболочек и формирования двойного электрического слоя.

Проведённые исследования показали, что промежуточный эмульсионный слой состоит из множества эмульсий и содержит механические примеси (сульфиды, глины и др.). Разработана методика оценки эффективности промежуточного эмульсионного слоя, которая заключается в сравнении мелкодисперсных эмульгированных водяных капель на входе и остаточной воды на выходе отстойника.

Основные этапы включают:

1. Определение критического радиуса капель на основе закона Стокса.
2. Расчёт теоретического содержания воды на выходе отстойника.
3. Определение фактического содержания воды.



4. Оценка эффективности ПЭС через показатель удержания воды.

Математические модели, основанные на законах Фоккера-Планка, Дарси и Козени-Кармена, описывают процессы коагуляции, дробления капель и их распределение по размерам. Установлено, что устойчивость нефтяных эмульсий связана с образованием двойного электрического слоя, а также с функцией промежуточного эмульсионного слоя как гидравлического фильтра.

Разработаны алгоритмы расчёта времени пребывания нефти в горизонтальных и шаровых отстойниках

$$\tau_{H1} = (nl/x_1)\sqrt{[6R_1(2R_1 - h_1^*) + (2R_1 - h_1^*)^2] R_1^2/3 - \sqrt{[2R_1(2R_1 - h_1^*) + (2R_1 - h_1^*)^2](R_1 - h_1^*)^2}} \quad (13)$$

$$\tau_{H2} = \pi(2R_2 - h_2^*)^2 (R_2 + h_2^*)/3x_1 \quad (14)$$

где  $n$  -коэффициент, отражающий количество потоков;  $l$  -длина горизонтального аппарата;  $R_1$  и  $R_2$  -радиусы горизонтальных и шаровых аппаратов;  $h_1^*$  и  $h_2^*$  -суммарный уровень водяной подушки и воды в промежуточном эмульсионном слое горизонтального и шарового аппарата;  $x_1$  -коэффициент, отражающий скорость потока или сопротивление потоку в системе.

Модели позволяют прогнозировать содержание остаточной воды в обезвоженной нефти и оптимизировать процессы термохимической подготовки нефти.

Предложенные математические модели <sup>7</sup> предоставляют всестороннее описание процессов термохимического обезвоживания нефти, включая коагуляцию, дробление капель и их распределение по размерам.

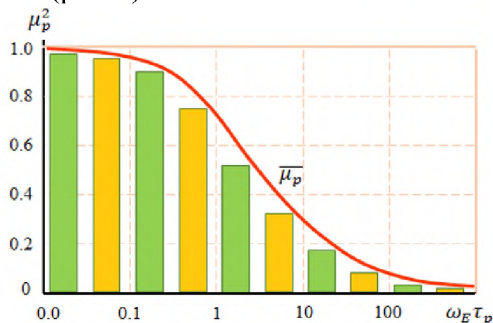
---

<sup>7</sup> Rzayev, A.G. Modeling of Emulsion Formation and Breaking in Thermochemical Oil Treatment Process / A.G., Rzayev, G.I. Kelbaliyev, G.R. Mustafayeva [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. Vol.54, №3, - p.249-264.

Эти модели не только отражают динамику разрушения эмульсий, но и создают научно обоснованную платформу для разработки и оптимизации технологий подготовки нефти.

**Глава 5** посвящена диффузионно-миграционным и кристаллизационным процессам при осаждении веществ в трубопроводах сложной конфигурации, используемых для сбора и транспорта нефти в морских условиях. Процессы осаждения и перемещения фаз составляют основу процессов разделения и расслоения нефтяных эмульсий в гравитационном поле. Эти процессы тесно связаны с гидродинамической структурой и направлением потока, взаимодействием частиц между собой, распределением размеров полидисперсных частиц, их формой и концентрацией, а также с физико-химическими свойствами самих частиц и несущей среды. Важную роль играют также физико-химические превращения, диффузионный перенос и осаждение частиц в турбулентных потоках, а также стохастическая природа полидисперсных систем.

В работе<sup>8</sup> рассматриваются особенности осаждения частиц из потока жидкости. Показано, что с увеличением размеров частиц степень их увлечения пульсирующей турбулентной средой стремится к нулю (рис.1).



**Рисунок 1. Степень увлечения частиц в пульсирующей турбулентной среде**

<sup>8</sup> Мустафаева, Г.Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензий // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017. №1, - с.33-37.

Мелкодисперсные частицы, реагируя на турбулентные среды, совершают пульсационное движение относительно молекул несущей фазы и беспорядочное движение во всех направлениях благодаря турбулентной диффузии.

Эти параметры играют важную роль в определении степени миграции и осаждения частиц в турбулентном потоке. Изучаются вопросы осаждения единичной частицы в медленном потоке и в концентрированном дисперсном потоке.

Решение проблемы осаждения частиц на внутренней поверхности трубчатых аппаратов достаточно известно для малых чисел Рейнольдса, и трудности возникают лишь при умеренных и больших числах Рейнольдса, когда в модели появляются нелинейные члены, характеризующие общую картину обтекания частицы. На основе базовых формул предложена модель, приемлемая для описания скорости осаждения единичных твердых сферических частиц, которая была адаптирована для решения специфической задачи, связанной с осаждением частиц в условиях турбулентного потока, что представляет собой важный вклад в описание процессов разделения и расслоения эмульсий.

В работе также изучается осаждение частиц из концентрированного дисперсного потока, характерного для суспензий с высокой концентрацией. Такие системы сопровождаются взаимодействием частиц, стеснением осаждения, коагуляцией и образованием агломератов. Основной проблемой является гравитационная коагуляция, при которой мелкие частицы захватываются более крупными.

Для описания скорости осаждения сферических частиц традиционно применяются формула Ричардсона-Заки, где показатель степени  $n$  зависит от размеров частиц и их объемной доли. На их основе и используя различные эмпирические зависимости скорость стесненного осаждения частиц представлена в виде:

$$\frac{V_p}{V_s} = \xi(\varphi, \alpha). \quad (15)$$

Где  $\varphi$  -объемная доля частиц в потоке;  $\xi(\varphi, \alpha)$  -функция, характеризующая влияние параметров среды и размеров на стесненность движения.

При объемной доле  $\varphi > 0,8$  отмечается разброс данных, вызванный увеличением вязкости суспензии. Показатель  $n$  также зависит от числа Галилея ( $Ga$ ) и других факторов. В литературе приводятся сложные зависимости показателя  $n$  от числа Галилея, однако в данной работе разработано упрощенное выражение для  $n$ :

$$n = \frac{4,75}{(1+0,0005Ga^2)^{\frac{1}{25}}}. \quad (16)$$

Где  $n$ -показатель степени,  $Ga = \frac{a^3 \rho_c (\rho_a - \rho_c) g}{\eta_c^2}$  -число Галилея.

Оно отличается простотой, включает меньше эмпирических коэффициентов и более точно аппроксимирует экспериментальные данные, особенно при высоких значениях  $Ga$ . Предложенная модель упрощает расчеты и улучшает описание процессов осаждения в концентрированных потоках.

Анализ процессов осаждения частиц из дисперсных потоков выявил два ключевых механизма: миграционно-диффузионный и миграционно-гравитационный. Осаждение частиц может происходить несколькими путями: через непосредственное осаждение из объема потока за счет миграционно-гравитационного механизма, перенос частиц к пограничному слою и стенке трубы с последующим образованием плотного слоя, а также осаждение на стенке трубы за счет турбулентной диффузии. Такие процессы, часто встречающиеся в нефтяной промышленности, сопровождаются образованием плотного слоя на внутренних поверхностях труб, что влияет на гидродинамику, массо- и теплоперенос. Образующийся слой имеет низкую теплопроводность, снижает эффективность теплообмена и увеличивает гидравлическое сопротивление, что приводит к росту материальных и энергетических затрат.

Цель данного исследования заключается в моделировании этих механизмов осаждения частиц и анализе их влияния на процессы в трубопроводах. Для достижения цели были

разработаны уравнения, описывающие миграционно-диффузионный перенос частиц в турбулентных потоках и их осаждение на поверхности труб. Эти уравнения обеспечивают более точное представление о динамике процессов, что имеет важное значение для создания эффективных технологий и оборудования, применяемого в транспортировке и переработке нефти. В качестве результата исследования представлена формула для расчета потока частиц на единицу поверхности трубы, которая имеет вид

$$J = -D_T \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=R} = D \left( \frac{RV_D}{\nu_c} \right)^4 \left( \frac{DV_D^2 R}{\nu_c^3} \right)^{3/4} x^{-1/4} (C_p - C_0). \quad (17)$$

Где  $C$  -концентрация частиц;  $D_T$ ,  $D$  -коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии;  $V$ ,  $V_D$  -скорость и динамическая скорость потока;  $R$ -радиус трубы;  $C_p$  и  $C_0$ -текущая и начальная концентрация частиц;  $x$ -характерная длина трубы.

Эта формула позволяет количественно оценить процесс осаждения частиц на поверхности трубы, в зависимости от характеристик потока, вязкости и диффузионных свойств.

Одной из ключевых проблем в трубопроводных системах является кристаллизация и отложение парафинов из нефти в транспортных трубах. В работе<sup>9</sup> исследуются механизмы этого процесса, предложена диффузионная кинетика кристаллизации парафинов и модель их отложения как в трубах, так и в теплообменных аппаратах.

Осаждение парафина из нефти при низких температурах негативно влияет на параметры потока. Процесс начинается с кристаллизации парафинов и асфальто-смолистых веществ на стенках труб, сначала в пограничном слое, а затем на сформированном осадке. Радиальный температурный и концентрационный градиенты способствуют диффузии парафинов к стенке, где они кристаллизуются.

---

<sup>9</sup> Kelbaliyev, G.I. Crystallization of paraffin from the oil in a pipe and deposition of asphaltene-paraffin substances on the pipe walls / G.I.Kelbaliyev, S.R. Rasulov, G.R. Mustafayeva [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. Vol.91, №5, - p.1227-1232.

Ключевыми факторами осаждения являются температура, скорость потока, свойства нефти и шероховатость труб.

Парафины кристаллизуются при снижении температуры, а адгезия усиливается на шероховатых поверхностях. Асфальто-смолистые вещества играют связующую роль, изменяя структуру осадка и повышая его прочность.

С учетом этого, разработана диффузионная модель кристаллизации парафинов, описывающая их осаждение и влияние отложений на гидродинамику. В отличие от эмпирических моделей, предложенная диффузионная модель учитывает кинетику процессов и позволяет точнее оценить образование и рост отложений.

В работе приведено уравнение кинетики кристаллизации парафина из нефти, что учитывает как перенос парафина из жидкой фазы в твердую, так и его миграцию к поверхности трубы, решение которого было представлено следующим образом

$$C(t) = C^*(T)[1 - \exp(-\beta t^n)] \quad (18)$$

где  $\beta$  -коэффициент массоотдачи;  $C$  -концентрация парафина в объеме пограничного слоя;  $C^*$  -равновесная концентрация парафина в жидкой и твердой фазах, зависящая от температуры.

Как следует из уравнения (18), при достижении максимальной толщины слоя парафинов концентрация парафинов на поверхности слоя достигает предельного значения, соответствующего равновесию. Это состояние определяет максимальную толщину слоя парафинов на поверхности. Если максимальная толщина отложившегося слоя парафинов становится равной радиусу трубы, происходит полная закупорка её сечения, что полностью блокирует поток.

Механизм формирования отложений на поверхности труб заключается в возникновении и росте кристаллов парафина при низких температурах, а также осаждении асфальто-смолистых веществ непосредственно на поверхности, контактирующей с нефтью, то есть в объеме пограничного слоя. По мере формирования этих отложений на поверхности образуется смоло-парафиновый слой, который со временем увеличивает свою

толщину. Важно отметить, что этот процесс оказывает значительное влияние на гидродинамические и тепло-массообменные характеристики системы. С ростом толщины отложений ухудшаются теплообменные и гидродинамические параметры, что приводит к дополнительным энергетическим и материальным затратам. Модель отложения парафинов и асфальто-смолистых веществ в транспортных трубах и трубах теплообменных аппаратов<sup>10</sup> может быть выражена с учетом этих факторов, что позволяет более точно прогнозировать развитие отложений и их влияние на функционирование трубопроводных систем

$$\delta_s(t) = R[1 - \exp(-m_s t)], \quad (19)$$

где  $m_s = \frac{I_{s0}}{2\pi\rho_s R_0^2}$ ,  $\delta_s$  -толщина отложившегося слоя парафина.

Сравнение моделей с имеющимися экспериментальными данными показало удовлетворительные результаты.

Приведенные выражения демонстрируют, что в случае ламинарного течения рост толщины отложений в трубах приводит к гидродинамической неустойчивости, а при турбулентном течении этот фактор способствует увеличению диссипации энергии, уменьшению масштаба турбулентности и, как следствие, затуханию интенсивности турбулентных пульсаций.

Таким образом, кристаллизация, осаждение и образование плотного слоя на поверхности труб оказывают обратное влияние на гидродинамику течения и процессы тепло- и массопереноса в трубах. Со временем, если наблюдается снижение температуры в ядре потока, частицы парафинов, вместе с частицами асфальтенов, начинают существенно влиять на структурообразование в потоке. Это, в свою очередь, изменяет реологические свойства нефти. Наличие асфальтенов и образование коагуляционных структур, таких как наноагрегаты и их кластеры, оказывает значительное воздействие на реологические характеристики нефти. Эти

---

<sup>10</sup> Келбалиев, Г.И. Моделирование процессов разделения фаз при течении нефтяных дисперсных систем / Г.И. Келбалиев, В.И. Керимли, Г.Р. Мустафаева [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2019, №1, - с.68-71.

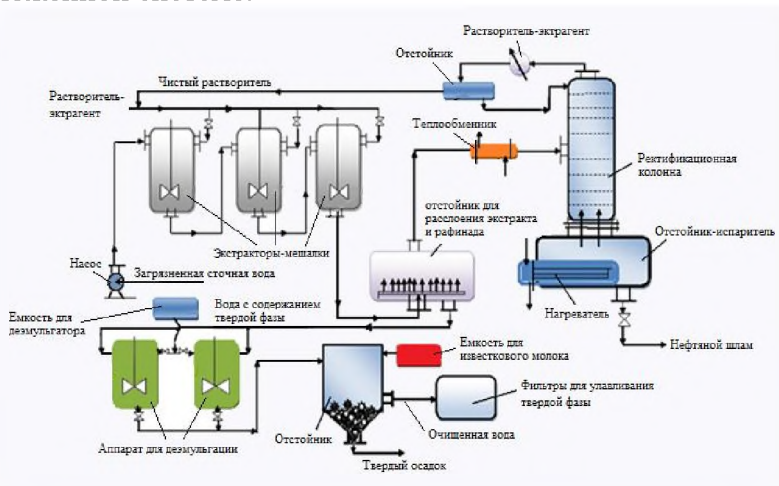
структуры могут изменять ее вязкость, что усложняет транспортировку нефти и влияет на производственные показатели.

Кроме того, асфальтены, осаждаясь на поверхности пористой среды, изменяют её пористость и могут приводить к закупорке пор пласта, что создаёт дополнительные проблемы при переработке и транспортировке нефти, снижая эффективность работы скважин и оборудования. Для решения этих проблем важно разработать эффективные методы очистки и разделения асфальтенов и других твердых фаз, которые могут быть источниками загрязнения.

В связи с этим, на основе анализа растворимости асфальтенов в различных ароматических углеводородах была предложена технология жидкофазной экстракции, направленная на очистку сточных вод от асфальтенов и твердых частиц. Используя явления коалесценции и дробления, а также процессы массопереноса в системах жидкость-жидкость, была разработана методика экстракции с применением толуола. Эффективность этой технологии зависит от оптимальных условий экстракции, таких как соотношение воды и растворителя (1:35-40), а также расслоения фаз в отстойных системах и разделения в ректификационной колонне. Применение этой технологии позволяет решить экологические проблемы, связанные с загрязнением сточных вод, и повысить эффективность переработки нефти и работы нефтяных скважин. Реализация технологии может быть осуществлена в трех последовательно соединенных экстракторах, с подачей толуола в каждый аппарат и выводом экстрагента из каждого отстойника (рис.2). Использование коагулянта позволяет разработать эффективную схему разделения мелкодисперсной твердой фазы от воды, улучшая качество экстракции и снижая количество нерастворимых остатков в водной фазе. Для оценки кинетики растворения асфальтосмолистых веществ в толуоле была предложена модель, основанная на явлениях диффузионного переноса массы, что позволяет более точно предсказать поведение системы и оптимизировать процесс экстракции.



Ввиду того, что время полного растворения частиц асфальтенов составляет 50-60 минут, что свидетельствует о высоком коэффициенте диффузии и эффективности экстракции в предложенной системе.



**Рисунок 2. Схема экстракции жидкой фазы при очистке нефтяных сточных вод от асфальто-смолистых соединений**

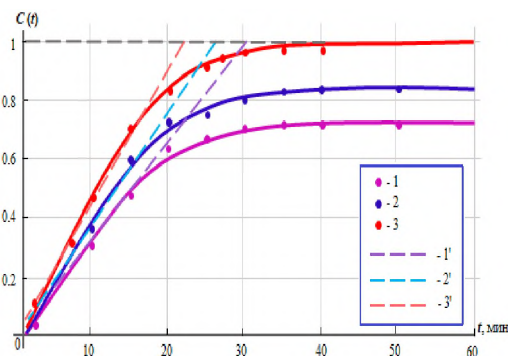
Это подтверждают, что предложенная технология экстракции с использованием толуола может быть эффективным инструментом для очистки сточных вод от асфальтенов и других твердых фаз. Результаты также показывают, что с помощью правильно настроенных условий экстракции и последующего разделения фаз можно добиться высокой степени очистки, минимизируя экологические риски и повышая производительность переработки нефти.

Для описания кинетики процесса разработано уравнение массообмена, учитывающее температурные и диффузионные параметры. Экспериментальные данные, собранные в диапазоне температур 20-60 °С, подтверждают применимость предложенной модели для описания растворения асфальтосмолистых веществ. Уравнение для растворения асфальтосмолистых веществ в толуоле можно представить в следующем виде

$$C(t) = C^* \left( 1 - \exp \left( -at^{\frac{3}{2}} \right) \right). \quad (20)$$

Где  $C$  -концентрация поглощаемого вещества,  $C^*$  - концентрация равновесия,  $\alpha$  -коэффициент турбулентных пульсаций.

Это уравнение учитывает диффузионный процесс растворения частиц в растворителе и позволяет предсказать динамику растворения, что важно для оптимизации экстракции и повышения эффективности очистки сточных вод. На рис.3 представлены кинетические кривые растворения асфальтовых и смолистых веществ в толуоле при различных температурах.



**Рисунок 3. Кинетические кривые растворения асфальтовых и смолистых веществ в толуоле при температурах: 1 - 20°C; 2 - 40°C; 3 - 60°C.** Прямые отвечают линейной кинетике растворения асфальтовых веществ в толуоле при температурах, равных: 1' - 20°C; 2' - 40°C; 3' - 60°C.

**Шестая глава** посвящена исследованию реологических характеристик структурированных нефтей и моделированию их свойств. Особое внимание уделено дисперсным системам, в которых агрегативная и седиментационная устойчивость определяют структуру среды. Формирование структур в таких системах связано с образованием агрегатов частиц или кластеров, что оказывает существенное влияние на их физические свойства.

Рассматривается процесс структурообразования, включающий взаимодействие частиц, приводящее к формированию коагуляционных структур, изменению вязкости и другим реологическим параметрам. В работе выделены ключевые области, характеризующие изменения вязкости в зависимости от

концентрации частиц, и изучены особенности каждой из них. Целью исследования является разработка моделей, описывающих вязкость дисперсных систем с учетом процессов структурообразования. Это позволяет глубже понять механизмы формирования реологических свойств и создать подходы к прогнозированию поведения структурированных нефтей в различных условиях.

Структурирование дисперсных систем представляет собой сложный процесс, связанный с формированием коагуляционных структур, агрегатов и каркасных сеток частиц. Этот процесс определяет реологические свойства среды, включая её вязкость, подвижность и тиксотропные характеристики.

С увеличением концентрации частиц расстояние между ними уменьшается, что способствует росту вероятности их взаимодействия и коагуляции. В результате образуются структурированные системы, обладающие высокой вязкостью и низкой подвижностью.

Разрушение таких структур может происходить под воздействием внешних механических факторов, таких как увеличение скорости сдвига, давления или турбулентности потока. Эти процессы оказывают влияние не только на разрушение каркасных структур, но и на динамику формирования новых агрегатов. Турбулентные пульсации увеличивают частоту столкновений частиц, что способствует как дроблению существующих структур, так и формированию новых коагуляционных связей.

Тонкодисперсные частицы, приближаясь друг к другу на расстояние порядка их диаметра, взаимодействуют за счёт гидродинамических сил и броуновской диффузии, что приводит к коагуляции и образованию новых структур. Скорость образования таких структур определяется конвективным и диффузионным переносом частиц.

Для описания процесса используются уравнения <sup>11</sup>, связывающие движение частиц с напряжением сдвига.

---

<sup>11</sup> Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Viscosity of Structured disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2018. №3, - p.404-411.

На основе экспериментальных данных из литературы можно получить полуэмпирическую зависимость вязкости дисперсной среды от числа Пекле, которая выражается следующей формулой:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \exp\left(-mPe^{\frac{1}{2}}\right), \quad (21)$$

где  $\eta$ -эффективная вязкость системы;  $\eta_0, \eta_{\infty}$ -начальная ( $\tau \leq \tau_0$ ) и конечная динамическая вязкость нефти ( $\tau \gg \tau_0$ );

$Pe = \frac{\alpha}{D} \dot{\gamma} = \frac{6\pi\alpha^3\eta}{k_B T} \dot{\gamma}$  -число Пекле или безразмерная скорость сдвигового течения,

При больших числах Пекле  $Pe$  система характеризуется плотной упаковкой частиц, что соответствует полному структурообразованию. Это выражение описывает характер кривой зависимости вязкости от объемной концентрации в области ее деформации и дальнейшего структурообразования.

Область уменьшения вязкости при сдвиговом течении наблюдается около числа Пекле ( $Pe = 1$ ), когда гидродинамические и броуновские силы имеют равные значения. При  $Pe > 1$ , вязкость стремится к значению  $\eta \rightarrow \eta_{\infty}$  что возможно при больших значениях предела текучести ( $\dot{\gamma}$ ).

Таким образом, изучение коагуляции в сдвиговом поле позволяет описать динамику формирования структур и влияние на реологические характеристики дисперсных систем, что является важным этапом моделирования структурированных нефтей.

Вязкость является ключевым параметром реологических жидкостей, определяющим их подвижность. В дисперсных системах она зависит от напряжения сдвига, концентрации, размеров и формы частиц. Для предельно разбавленных сред с мелкодисперсными сферическими частицами используется уравнение Эйнштейна.

Однако, для более сложных систем предложены многочисленные эмпирические формулы, описывающие зависимость вязкости от концентрации частиц, например уравнение Барни и Мазрахи.

Большинство формул не учитывают структурообразование, которое деформирует кривую вязкости. В работе разработана

модель для расчета вязкости дисперсных систем с учетом их структурообразования.

Из анализа экспериментальных данных следует, что вязкость в области начала структурообразования подчиняется полуэмпирическому уравнению:

$$\frac{\eta}{\eta_c} = \frac{\eta_0 - \eta_s}{\eta_c} \exp \left[ -\frac{k}{2} (\varphi - \varphi_s)^2 \right]. \quad (22)$$

Здесь  $\eta_c$  -вязкость сред;  $\eta_s$  -сдвиговая вязкость Пас;  $\varphi$  -объемная концентрация частиц;  $\varphi_s$  -концентрация частиц, при котором начинается структурообразование;  $k$  -коэффициент, определяемый экспериментальным путем.

Данная формула позволяет учитывать изменение вязкости дисперсной системы при переходе от ламинарного течения к условиям, где начинается формирование структур. Это критически важно для систем с тиксотропными свойствами, например, асфальтовых композиций с добавками полиэтилена или нефтяных эмульсий.

Зависимость вязкости от концентрации при структурообразовании демонстрирует влияние объемной доли частиц на реологические характеристики. Она также показывает возможность разрушения агрегатов при снижении концентрации или повышении напряжения сдвига. Эти зависимости находят практическое применение в моделировании и оптимизации свойств дисперсных систем.

На рис.4 представлена зависимость вязкости от содержания капель воды в нефтяной эмульсии, которая описывается следующим уравнением:

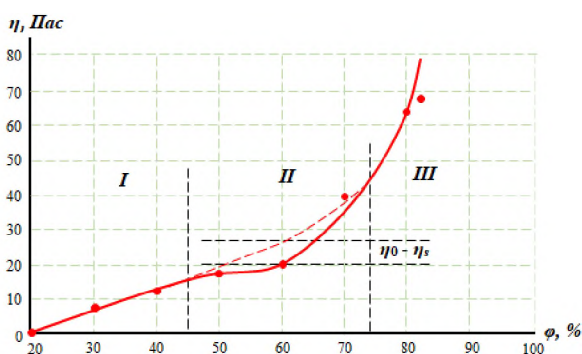
$$\eta = (-11,6 + 0,6\varphi) \exp \left[ \frac{2,8\varphi}{(\varphi - 100)^2} \right] - 7 \exp[-0,01(\varphi - 60)^2] \quad (23)$$

Эта формула позволяет вычислить относительную вязкость дисперсной среды, где динамическая вязкость нефти Мурадханского месторождения (Азербайджан) служит исходным значением и равна  $\eta_c \approx 14$  Пас. На графиках хорошо видны области структурообразования, а также резкий рост вязкости.

Обобщенный вид зависимости вязкости от объемной концентрации частиц можно выразить через формулу:

$$\eta = (-11,6 + 0,6\varphi) \exp\left[\frac{2,8\varphi}{(\varphi-100)^2}\right] - 7 \exp[-0,01(\varphi - 60)^2] \quad (24)$$

Последний член в этой формуле отвечает за начало структурообразования в системе и показывает, как при увеличении концентрации частиц начинается их уплотнение и формирование структуры, что вызывает деформацию кривой вязкости.



**Рисунок 4. Зависимость вязкости нефти от обводненности**

Структурообразование в неподвижном слое твердых частиц и сдвиговом потоке отличается степенью свободы частиц. В неподвижном слое сдвиговое течение характеризуется вязкостью, напряжением сдвига и изменением пористости слоя.

Из экспериментальных данных и уравнений в литературе следует, что эффективная вязкость дисперсной системы существенно зависит от объемной доли и размера частиц. При увеличении размеров частиц эффективная вязкость растет. Это связано с тем, что при крупных частицах не образуются коагуляционные структуры или агрегаты, а система формирует простую плотную упаковку частиц, что приводит к увеличению вязкости.

Неподвижный слой можно рассматривать как цепочку упруго связанных частиц, между которыми находится жидкость. В

таким случае объемная вязкость структурированного слоя частиц определяется как:

$$\eta_v = \frac{4}{3} \eta_c \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad (25)$$

Следует отметить, что приведенные формулы для вычисления вязкости не являются феноменологическими, а представляют собой полуэмпирические выражения, отражающие экспериментальные данные. Тем не менее, они успешно описывают характер изменения кривой вязкости в условиях структурообразования дисперсной среды, особенно на стадии начала структурирования. Важно подчеркнуть, что процесс формирования структурированных систем зависит от содержания (объемной доли) частиц в нефти, интервала и силы взаимодействия между частицами. Агрегирование частиц происходит при определенной вероятности их столкновения, что, в свою очередь, способствует образованию коагуляционных структур и формированию агрегатов.

Агрегативно-неустойчивые нефтяные дисперсные системы изменяются из-за структурообразования, коагуляции и разрушения частиц асфальтенов, что влияет на их объем и размер. Взаимодействие частиц приводит к образованию вязкоупругого каркаса, который влияет на вязкость и реологические свойства нефти.

Частицы асфальтенов коагулируют, образуя флоккулы, которые могут осаждаться на стенках труб и коллекторах. Наноагрегаты формируют структуру с высокой вязкостью, обладая тиксотропными свойствами: при уменьшении давления происходит структурирование, а при росте напряжения - разрушение каркаса.

При этом возникает необходимость разработки реологической модели нефтяных систем с учетом агрегации частиц и их влияния на вязкость.

Принцип исследования коагуляции частиц асфальтенов в объеме нефти основывается на их переносе за счет молекулярной диффузии в ламинарном потоке и турбулентной диффузии. В этом процессе выделяется неподвижная частица, заключенная в сферу радиусом  $R \approx (1,5 - 2,0)$ . Предполагается, что любая частица,

пересекающая эту сферу, с высокой вероятностью сталкивается и коагулирует с выделенной частицей. Исходя из этого условия, предложены модели<sup>12</sup> коагуляции частиц асфальтенов и расчета размеров наноагрегатов, которые могут быть представлены в виде следующих уравнений для расчета их роста и размеров:

$$a_g = a_{g_\infty} \left[ 1 - \exp \left( -C_0 \varphi_0 \left( \frac{\varepsilon_R}{v_c} \right)^{1/2} t \right) \right]^{1/3} \quad (26)$$

где  $a_g$ ,  $a_{g_\infty}$  - текущий и конечный размеры агрегата;  $C_0$  - коэффициент, определяемый по экспериментальным данным;  $\varepsilon_R$  - удельная диссипация энергии в единице объема.

Агрегаты, образующиеся в результате коагуляции и агрегации, состоят из множества мельчайших частиц, связанных между собой, и имеют рыхлую структуру, хотя их плотность возрастает к центру. Для улучшения реологических свойств структурированных нефтяных дисперсных систем необходимо механическое разрушение вязкоупругого каркаса асфальтенов под действием внешних сил, таких как градиент скорости или давления. Разрушение каркаса приводит, прежде всего, к значительному снижению вязкости и увеличению подвижности дисперсной системы, что делает ее более удобной для дальнейшей переработки и транспортировки. Рассматриваются условия разрушения структуры, а также предложены реологические модели фильтрации нефтяных дисперсных систем с учетом уравнения уравнения Максвелла и моделей изменения вязкости и подвижности.

Влияние этих факторов на фильтрационные свойства нефтяных систем анализируется с использованием параметров, для структурированных нефтяных систем, в которых происходит коагуляция и агрегация частиц асфальтенов, а также их деформация и разрушение, закон фильтрации отклоняется от классической формы. Это объясняется изменением структуры нефти, когда вязкоупругий каркас асфальтенов подвергается

---

<sup>12</sup> Kelbaliev, G.İ. Rheology of structured oils / G.I. Kelbaliyev, S.R. Rasulov, G.R. Mustafayeva [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017. Vol.90, №4, - p.996-1002.



воздействию внешних сил, таких как градиенты скорости или давления моделей. Результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными, что подтверждает актуальность предложенных моделей.

Для структурированных нефтяных систем уравнение скорости фильтрации имеет вид:

$$V = K_1(T)(1 - \exp(-\alpha_1(T)(z/z_0)^6))z \quad (27)$$

где  $K_1$  - коэффициент фильтрации;  $T$  - температура;  $z = gradP$ ,  $z_0 = (gradP)_0$ ;  $K_1 = 3,01 \times 10^{-5} \exp(0,01824T)$ .

Изменение эффективной вязкости аномальной нефти от градиента давления на основе экспериментальных данных может быть описано эмпирической формулой:

$$\frac{\eta^* - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \exp(-30z^6) \quad (28)$$

Для большинства структурированных нефтей можно принять  $n = 6$  (зависит от свойств пласта, температуры и др. параметров). При низких скоростях течения эффективная вязкость нефти изменяется в зависимости от скорости сдвига или градиента давления: она уменьшается от максимального значения до минимального, а затем стабилизируется. Эти результаты подтверждают динамику изменения вязкости в процессе фильтрации и демонстрируют, как её поведение зависит от градиента давления.

Приведенные формулы применимы для расчёта процесса фильтрации нефтей в пористых слоях разных месторождений, где вязкость и коэффициент проницаемости нефти могут существенно влиять на её подвижность.

## ВЫВОДЫ

1. Для описания поведения неньютоновских (аномальных) нефтей разработана математическая модель, которая позволяет по экспоненциальному закону определять значения напряжения сдвига при его скачкообразном изменении [2].

2. Проведен системный анализ современного состояния процессов теплопередачи в горизонтальных трубопроводах и стволах нефтяных скважин. С учетом геометрического градиента и теплопроводности жидкости и газа, находящихся в межтрубном пространстве, предложена новая адекватная математическая модель процесса теплопередачи [3].

3. Показано, что процесс структурообразования нефти в капиллярах пласта коллектора может быть описан через изменение вязкости во времени. Предложена математическая модель экспоненциального характера, адекватно описывающая это изменение с учетом влияния вязкости нефти на остаточную нефтенасыщенность пластов. Полученная модель может быть использована при решении проблемы разработки трудноизвлекаемых запасов нефтяных месторождений [10].

4. Разработаны модели уплотнения пористой среды при осаждении асфальтенов в порах, а также получены решения уравнения нестационарной фильтрации. На основе этих решений предложены выражения для оценки фильтрационных характеристик пористой среды. Предложено уравнение для оценки затухания скорости фильтрации в пласте с пульсационным характером. Отмечено, что пульсационный характер затухания фильтрации нефти в пласте связан с ее естественным уплотнением под действием веса вышележащих слоев [11].

5. Для общего описания числа Дарси в широком диапазоне значений числа Рейнольдса предложено полуэмпирическое выражение [5].

6. Разработана модель для определения частоты столкновения частиц с учетом функции распределения дисперсированных частиц. Эта формула полноценно учитывает влияние распределения дисперсной фазы по размерам частиц на частоты их столкновений [7].

7. Предложена диффузионная модель образования адсорбционного слоя из асфальтосмолистых веществ на поверхности капель воды, а также приведена формула для оценки его толщины. Разработана модель совместной коалесценции и дробления капель в изотропном турбулентном потоке. Для оценки эволюции числа капель и их размеров по времени предложены уравнения, зависящие от частот дробления и коалесценции [25].

8. Разработана технология очистки нефтяных сточных вод с использованием рециркуляции растворителя, которая является экологически и экономически выгодной, поскольку позволяет эффективно обезвреживать нефтяные отходы, загрязняющие окружающую среду. Кроме того, предложенный процесс является безотходным [12].

9. Разработаны математические модели для описания механизмов осаждения, которые были сравнены с имеющимися экспериментальными данными. В работе исследована диффузионная кинетика кристаллизации парафинов и предложена модель их отложения как в транспортных трубах, так и в трубах теплообменных аппаратов [18,27].

10. Построена кинетическая модель растворения асфальтосмолистых веществ в ароматическом растворителе в зависимости от температуры, основанная на массопереносе в условиях изотропной турбулентности в пределах пограничного слоя. Разработано кинетическое уравнение, которое учитывает равенство диффузионного и конвективного потоков на поверхности частицы. Определены кинетические зависимости и коэффициенты растворения как для линейного, так и для нелинейного характера распределения концентрации растворенного вещества в пограничном слое [21].

11. Предложено обобщенное уравнение для вычисления вязкости структурированных дисперсных систем с присущими им реологическими свойствами. Выявлены характерные особенности области кривой вязкости на стадии структурообразования. Рассмотрены различные варианты уравнений вязкости структурированных дисперсных систем и проведено их сравнение с экспериментальными данными [24].

12. На основе рассмотренных проблем реологии структурированных нефтей получены уравнения, позволяющие оценить изменения размеров и массы наноагрегатов во времени, используя молекулярную и турбулентную диффузию частиц асфальтенов. Также предложены модели фильтрации и реологические модели, основанные на решении уравнения Максвелла для вязкоупругой жидкости. Даны две полуэмпирические реологические модели, которые удовлетворительно описывают экспериментальные данные [20].

### **РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Rzayev, Ab.H., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Sealing of oil reservoir as a result of deformation and sedimentation of various additives // Science & applied engineering quarterly, London, 2014. №4, - p. 6-11.

2. Расулов, С.Р., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование поведения аномальных (неньютоновских) нефтей // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти и газа и химия», 2014. Т.XV, - с. 70-75.

3. Гулуев, Г.А., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование процесса теплопередачи в стволе нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2015. №1, - с. 44-47.

4. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Разработка метода оценки состояния нефтяной залежи // Нефтепромысловое дело, 2015. №5, - с. 21-23.

5. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Проблемы нелинейностей уравнений фильтрации нефтей в пористых средах // Нефтепромысловое дело, 2015. №8, - с.23-26.

6. Расулов, С.Р., Оруджев, В.В., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Уплотнение нефтяного пласта в результате деформации и осаждения различных примесей // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2015. №4, - с. 101-112.

7. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Определение частоты столкновения частиц в полидисперсных системах // Ученые записки НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия», 2015. Т. XVI, - с.433-438.

8. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Ecological aspects of extraction process of organic solution from sewage by recycling // Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2016. №2, - p.111-120.

9. Рзаев, Аб.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Оценка реологических характеристик аномальных нефтей и нефтяных эмульсий // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2016. №3, - с.55-58.

10. Расулов, С.Р., Рзаев, Аб.Г., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Математическое моделирование процесса структурообразования нефти в пласте-коллекторе нефтяных месторождений // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2016, №3, - с.98-101.

11. Келбалиев, И.Г., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Моделирование фильтрации нефтей в пористой среде и технология жидкофазной экстракции асфальтенов // Теоретические основы химической технологии, 2016. Т.50, №6, - с.673-682.

12. Сулейманов, Г.З., Расулов, С.Р., Мустафаева Г.Р. [и др.] Использование жидкофазной экстракции в процессе очистки нефтяных сточных вод // Нефтепромысловое дело, 2016. №11, - с.55-59.

13. Расулов, С.Р., Келбалиев, Г.И., Мустафаева, Г.Р. Моделирование процессов фильтрации аномальных структурированных нефтей // Сборник тезисов международной научно-технической конференции посвященной памяти академика А. Х. Мирзаджанзаде, г. Уфа, 2016, - с.295-297.

14. Рзаев, Аб.Г., Нуриева, И.А., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Интенсификация процесса динамического отстоя нефтяной эмульсии // Азербайджанское нефтяное хозяйство, 2016. №11, - с.39-43.

15. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Механика и реология нефтяных дисперсных систем // Москва, Изд-во. «Маска», 2017. - 462 с.

16. Мустафаева, Г.Р. Определение вязкости структурированных нефтяных дисперсных систем // Сборник материалов Международной научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, г. Альметьевск, 2016, - с.40-43.

17. Мустафаева, Г.Р. Основные характеристики турбулентного течения нефтяных дисперсных систем // Сборник материалов Международной конференции «Рассохинские чтения», г.Ухта, 2017. Часть 1, - с.231-234.

18. Мустафаева, Г.Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензий // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017. №1, - с.33-37.

19. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Rheology of structured oils // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017. Vol.90, №4, - p.996-1002.

20. Kelbaliyev, G.I., Tagiyev, D.B., Mustafayeva, G.R. [et al.] Rheology of Structural oil disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017. №5, - p.729-735.

21. Tagiyev D.B., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Dissolution kinetics of asphaltresinous materials in aromatic solvents // Chemistry and Technology of Fuels and Oils 2017. Vol.53, №3, - p.345-351.

22. Мустафаева, Г.Р. Разрушение эмульсий в постоянном электрическом поле // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2017. №3, - с. 100-103.

23. Мустафаева, Г.Р. Особенности осаждения и образования плотного слоя частиц на внутренней поверхности труб // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2018. №2, - с.61-65.

24. Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Viscosity of Structured disperse Systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2018. №3, - p.404-411.

25. Kelbaliyev, G.İ., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Modeling of Phenomena of Drop Coalescence in Oil Emulsion Breaking

Processes // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. №2, - p.158-165.

26. Rzayev, A.G., Kelbaliyev, G.I., Mustafayeva, G.R. [et al.] Modeling of Emulsion Formation and Breaking in Thermochemical Oil Treatment Process // Chemistry and Technology of Fuels and oils, 2018. Vol.54, №3, - p.249-264.

27. Kelbaliyev, G.I., Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. [et al.] Crystallization of paraffin from the oil in a pipe and deposition of asphaltene-paraffin substances on the pipe walls // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. Vol.91, №5, - p.1227-1232.

28. Мустафаева, Г.Р. Реологические модели, присущие течению неньютоновских нефтей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2018. №4, - с.40-42.

29. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Реологические свойства структурированных нефтяных дисперсных систем // Вестник Азербайджанской инженерной академии, 2019, №1, - с.54-60.

30. Келбалиев, Г.И., Керимли, В.И., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Моделирование процессов разделения фаз при течении нефтяных дисперсных систем // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2019, №1, - с.68-71.

31. Сальников, А.В., Ягубов, Я.Х., Салаватов, Т.Ш., Мустафаева Г.Р. [и др.] Экспериментальная оценка адгезионных свойств внутреннего гладкостенного покрытия трубопроводов к асфальтосмолопарафинистым отложениям нефтей Ярегского месторождения// Socar Prossedings, 2020, №1, - с.51-58.

32. Rasulov, S.R., Mustafayeva, G.R. Hydrodynamic features of suspensions and emulsions flows // News of the National Academy of Sciences of the republic of Kazakhstan, Series Chemistry and technology, 2021. Vol.2, №446, - p.99-104.

33. Мустафаева, Г.Р. Влияние асфальтосмолистых веществ на разделение нефтяных эмульсий. Сборник тезисов международной научно-тех. Конференции // Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и

переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей // г. Ухта, 2022, - с.149-153.

34. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. Очистка нефтесодержащих сточных вод синергетической смесью // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2023, № 3, - с.35-39.

35. Келбалиев, Г.И., Расулов, С.Р., Мустафаева, Г.Р. [и др.] Зависимость вязкости нефтяных эмульсий от содержания частиц и воды // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2023, №6, - с.24-28.

**Личный вклад соискателя:**

[16, 17, 18, 22, 23, 28, 33] - работы, выполненные самостоятельно,

[10, 11, 15, 19, 20, 21, 24, 32, 34, 35]- в работах соискатель сформулировал проблему, участвовал при постановке задачи, предложил решение и участвовал в проверке правильности результатов.





Защита диссертации состоится 15 апреля 2025 года в 11<sup>00</sup> на заседании Диссертационного совета ВЕД 2.03, действующего на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Адрес: AZ1010, г. Баку, улица Д. Алиевой, 227

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Автореферат разослан по соответствующим адресам

11 марта 2025 года

Подписано в печать: 10.03.2025

Формат: А5

Объём: 76083

Тираж: 70