

Подбор поверхностно-активных веществ для химического увеличения нефтеотдачи при минерализации воды около 350 г/л

Литературный обзор

Подбор поверхностно-активных веществ для химического увеличения нефтеотдачи при минерализации воды около 350 г/л

Аннотация

Экстремально минерализованные пластовые воды ограничивают применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в химическом увеличении нефтеотдачи из-за риска потери растворимости, осаждения, высокой адсорбции и нестабильности композиции. Цель обзора — систематизировать критерии подбора ПАВ для заводнения при минерализации около 350 г/л и сопоставить классы композиций по их солестойкости, межфазной активности, способности изменять смачиваемость и пригодности к дальнейшей фильтрационной проверке. Рассмотрены безщелочные смеси, анионно-катионные и анионно-цвиттерийные системы, этоксилированные сульфонаты, амфотерные ПАВ, APG, АЕС-АРГ, ПАВ-полимерные и наноконпозиционные системы. Показано, что сверхнизкое межфазное натяжение является необходимым, но недостаточным критерием: итоговая нефтеотдача определяется также фазовым поведением, адсорбцией, изменением смачиваемости, контролем подвижности, фильтруемостью и совместимостью с породой и полимером. Наиболее близкие к целевым условиям результаты получены для отдельных составов, устойчивых в рассолах свыше 200 г/л и при температурах до 120 °С, однако прямое подтверждение пригодности именно для воды 350 г/л остаётся ограниченным. Обоснованная стратегия заключается в поэтапном скрининге на воде с полным ионным составом, за которым следуют испытания на породе и керне.

Ключевые слова: химическое увеличение нефтеотдачи, поверхностно-активные вещества, заводнение ПАВ, высокоминерализованный рассол, карбонатный коллектор, межфазное натяжение, адсорбция, смачиваемость

Значение задачи и границы обзора

Химическое увеличение нефтеотдачи предназначено для мобилизации обойденной и остаточной нефти, которая сохраняется после первичных и традиционных методов разработки. В отличие от общего обзора химических методов, задача подбора ПАВ для воды с минерализацией около 350 г/л требует одновременного рассмотрения межфазных, поверхностных и фильтрационных процессов в конкретной системе «нефть-рассол-порода» [1]. Столь высокая минерализация не может рассматриваться только как суммарное содержание растворённых солей: растворимость и поведение ПАВ

зависят от состава рассола, концентрации двухвалентных ионов, pH, температуры, давления и свойств поверхности коллектора.

В технологии увеличения нефтеотдачи с применением ПАВ выделяют заводнение и стимуляционные режимы. Для рассматриваемой задачи принципиально важен режим заводнения, поскольку состав должен не только взаимодействовать с нефтью на забое, но и сохранять устойчивость при транспортировании через поровое пространство. Основные механизмы действия включают снижение межфазного натяжения на границе нефть-вода и изменение смачиваемости, благодаря чему остаточная нефть становится более подвижной [2][3].

Граница настоящего обзора задана минерализацией около 350 г/л. Поэтому результаты для рассолов свыше 200 г/л рассматриваются как близкие к целевым, а данные для существенно менее минерализованных систем — как предварительные или экстраполяционные. Такое разграничение особенно важно для высокотемпературных карбонатных коллекторов: перенос результатов, полученных в песчаниках или при мягких рассолах, не является автоматическим. Выбор ПАВ должен учитывать одновременно давление, температуру, полный ионный профиль, жёсткость и минералогия породы [4][5].

Критерии подбора и постановка проблемы

Подбор ПАВ следует понимать как многокритериальную процедуру, а не как поиск вещества с минимальным межфазным натяжением. К базовым характеристикам относятся критическая концентрация мицеллообразования, гидрофильно-липофильный баланс, фазовое поведение, дзета-потенциал, растворимость, адсорбция и удерживание. При использовании косурфактанта или полимера к ним добавляются совместимость компонентов, изменение вязкости, фильтруемость и термохимическая стабильность [6].

Межфазное натяжение характеризует энергетическое состояние границы нефть-вода, но не описывает весь процесс вытеснения. ПАВ может обеспечить низкое значение этого параметра и одновременно потерять активность вследствие адсорбции, перейти в двухфазное состояние или изменить смачиваемость недостаточно для эффективной мобилизации нефти. Поэтому критерии скрининга должны связывать измеряемое свойство с технологическим следствием.

Матрица условий рассола и критериев допуска к следующему этапу испытаний

Условие рассола	Критическое свойство ПАВ	Измеряемый показатель	Значение для отбора
Высокая суммарная минерализация	Растворимость и однофазность	Фазовая стабильность, отсутствие осадка	Исключение закупорки и потери активной концентрации
Высокая жёсткость и присутствие Ca^{2+} , Mg^{2+}	Ионная совместимость	Осаждение, изменение межфазного натяжения, адсорбция	Оценка устойчивости в фактическом рассоле
Карбонатная поверхность	Контролируемая адсорбция и изменение смачиваемости	Краевой угол, плотность адсорбции, удерживание	Проверка мобилизации нефти из матрицы

Условие рассола	Критическое свойство ПАВ	Измеряемый показатель	Значение для отбора
Совместная закачка с полимером	Сохранение вязкости и фильтруемости	Вязкость, отношение подвижностей, перепад давления	Предотвращение ухудшения приемистости

Суммарная минерализация и ионный состав должны анализироваться отдельно. Двухвалентные ионы способны усиливать взаимодействие ПАВ с минеральной поверхностью, вызывать осаждение или менять структуру мицелл. При высокой жёсткости градиент солёности, эффективный в мягком рассоле, может утрачивать преимущества из-за роста адсорбционных потерь [7]. В карбонатах этот эффект дополнительно определяется зарядом и реакционной способностью кальцита и доломита.

Тип породы ограничивает переносимость обобщений. Анионные ПАВ чаще рассматриваются для песчаников, тогда как в карбонатах перспективными могут быть неионогенные, катионные или комбинированные системы [8]. Это различие связано не только с химией рассола, но и с исходной смачиваемостью, минералогией и механизмом удержания нефти.

Исследовательский ландшафт: классы ПАВ и композиционные стратегии

Исследования высокоминерализованных систем развиваются по нескольким направлениям. Первая стратегия состоит в создании безщелочных смесей, в которых соотношение компонентов адаптируется к минерализации и заряду поверхности породы. Для таких композиций изучались режимы от менее 10 000 до более 100 000 ppm TDS; следовательно, их релевантность для 350 г/л определяется не самым широким диапазоном, а воспроизводимостью поведения в конкретном ионном составе [9].

Анионно-катионные и анионно-цвиттерионные смеси используют сильное взаимодействие компонентов для формирования агрегатов с повышенной солестойкостью. В отдельных системах сообщалось о межфазном натяжении порядка 10^{-3} мН/м. Однако такое значение характеризует межфазную активность в исследованной системе и не заменяет проверку растворимости, адсорбции и фильтруемости.

Вторая группа включает этоксилированные сульфонаты и амфотерные ПАВ, рассчитанные на высокоминерализованные карбонатные коллекторы. Для алкилэфирсульфонатов сообщалась устойчивость к высокой минерализации и температуре в условиях карбонатного месторождения, а динамические измерения показывали кратковременное достижение сверхнизкого межфазного натяжения [10]. Это подчёркивает необходимость регистрировать не только конечное, но и временное поведение межфазного натяжения.

Третье направление связано с APG и смесями АЕС-APG. АЕС и его композиции с алкилполиглюкозидом образовывали микроэмульсии типа III со сверхнизким межфазным натяжением порядка 10^{-3} мН/м и были выделены как перспективные для высокотемпературных и высокоминерализованных условий [11]. Для микроэмульсионных систем важны не только межфазная активность, но и солюбилизация нефти и воды, вязкость и плотность фаз.

Таксономическая матрица стратегий подбора ПАВ

Класс или композиция	Основная стратегия	Условия подтверждения	Уровень подтверждения для 350 г/л
Безщелочные смеси	Расширение диапазона минерализации изменением соотношения компонентов	Очень низкая и очень высокая минерализация, включая более 100 000 ppm TDS	Экстраполяционный; требуется проверка полного ионного состава
Анионно-катионные и анионно-цвиттерионные смеси	Формирование солестойких высокоактивных агрегатов	Сверхнизкое межфазное натяжение порядка 10^{-3} мН/м	Перспективный лабораторный кандидат
Этоксильированные сульфаты и амфотерные ПАВ	Сохранение растворимости и активности в карбонатах	Высокоминерализованный карбонатный коллектор и повышенная температура	Близкие условия; необходима проверка при 350 г/л
АЕС-APG	Формирование микроэмulsion типа III	Высокая температура и минерализация; межфазное натяжение порядка 10^{-3} мН/м	Перспективный, но преимущественно лабораторный уровень
ПАВ-полимерные и нанокомпозиционные системы	Совмещение межфазной активности с контролем подвижности или изменением поверхности	Высокотемпературные и высокоминерализованные карбонатные системы	Требуется совместная и фильтрационная и кинетическая проверка

Композиционные подходы расширяют функциональность ПАВ. Полимер снижает отношение подвижностей и улучшает охват пласта, тогда как ПАВ мобилизует остаточную нефть; наночастицы могут дополнительно влиять на смачиваемость и адсорбционные потери. Но каждое добавление увеличивает число потенциальных несовместимостей. Поэтому результаты для минерализации ниже 350 г/л должны обозначаться как предварительные даже при высокой межфазной активности.

Методы испытаний и доказательная база

Надёжный скрининг начинается с приготовления растворов на фактической пластовой воде или на воспроизводимо моделируемом рассоле. Использование только дистиллированной воды либо упрощённого раствора NaCl не позволяет оценить роль Ca^{2+} , Mg^{2+} , сульфатов, бикарбонатов и других компонентов, определяющих фазовое поведение и адсорбцию. После приготовления необходимо проверить растворимость, прозрачность, наличие осадка и стабильность во времени при пластовой температуре.

Измерение межфазного натяжения должно включать статический и динамический режимы. В высокоминерализованных карбонатных системах сверхнизкое значение

может достигаться кратковременно; поэтому существенны время установления, длительность сохранения активности и изменение показателя после контакта с породой. Исследования алкилэфирсульфонатов показывают, что динамическое поведение способно скрываться за одним конечным измерением [10].

Следующий уровень — оценка адсорбции и удерживания. Для карбонатной поверхности применялись периодические адсорбционные испытания при разных концентрациях и временах, а электропроводность использовалась для мониторинга поглощения ПАВ в присутствии наночастиц; методы XRD, SEM и FTIR позволяли характеризовать связанные физико-химические изменения [12]. Такие данные необходимо связывать с материальным балансом ПАВ и с риском потери активной концентрации при фильтрации.

Для микроэмульсий скрининг расширяется до построения фазовых диаграмм и оценки солюбилизационной способности, вязкости и плотности. Фазовое поведение системы «нефть–рассол–ПАВ–косурфактант» зависит от минерализации, температуры, давления и состава микроэмульсии [13]. Для ПАВ–полимерных оторочек дополнительно проверяют вязкость, фильтруемость, совместимость, химическую и термическую стабильность полимера [14].

Только после этих этапов оправданы испытания на керне или в моделях пласта. Они должны фиксировать тип породы, модельную либо фактическую воду, температуру, продолжительность контакта, перепад давления, приемистость, удерживание и дополнительную нефтеотдачу. Иерархия доказательств в этом случае проходит путь от межфазного измерения к фазовой стабильности, затем к адсорбции и фильтрации и, наконец, к нефтеотдаче на керне.

Последовательность испытаний и уровень экспериментального подтверждения

Этап	Объект испытания	Ключевые показатели	Ограничение интерпретации
1	Раствор в фактическом рассоле	Растворимость, осадок, стабильность	Не характеризует взаимодействие с породой
2	Граница нефть–рассол	Статическое и динамическое межфазное натяжение	Низкое значение не гарантирует нефтеотдачу
3	Порода и измельчённый минерал	Адсорбция, краевой угол, удерживание	Модельная поверхность может отличаться от керна
4	ПАВ–полимер или микроэмульсия	Вязкость, фильтруемость, солюбилизация, фазовая стабильность	Не учитывает неоднородность пласта
5	Керн или модель пласта	Перепад давления, приемистость, удерживание, дополнительная нефтеотдача	Результат ограничен выбранным керном и режимом закачки

Синтез результатов и сравнительная оценка кандидатов

Главный результат сопоставления состоит в том, что минимальное межфазное натяжение нельзя использовать как единственный критерий ранжирования. В высокотемпературном высокоминерализованном карбонатном коллекторе ПАВ с низким межфазным натяжением не всегда обеспечивало эффективную отмывку, а оптимизированная система недостаточно меняла смачиваемость карбоната. В испытанных условиях очевидной связи между межфазным натяжением и увеличением нефтеотдачи не наблюдалось [15]. Это не отменяет роли межфазной активности, но переводит её из статуса конечного критерия в состав многопараметрической оценки.

Для нефтесмачиваемых карбонатов более убедительной выглядит стратегия одновременного снижения межфазного натяжения и изменения смачиваемости. Такое сочетание облегчает капиллярную и гравитационную пропитку матрицы и перенос нефти в трещины. В моделировании для трещиноватого карбоната синергизм этих механизмов был связан с различиями остаточной нефтенасыщенности порядка 10–20% между сопоставленными режимами пропитки и гравитационного дренирования [16]. Однако данное наблюдение относится к конкретной модели и не может без дополнительной проверки распространяться на все карбонатные коллекторы.

ПАВ-полимерные системы решают другую часть задачи — управление подвижностью и охватом пласта. Для оторочек в высокотемпературных и высокоминерализованных условиях сообщалось об увеличении нефтеотдачи на 4,93–21,02% от исходных запасов; при этом снижение отношения подвижностей оказывалось важнее дальнейшего уменьшения межфазного натяжения. Одновременно необходимо учитывать приемистость, эмульгирование и стоимость [17]. Следовательно, полимер не является нейтральным носителем ПАВ: он меняет реологию и время достижения межфазного равновесия.

Нанокпозиционные системы могут снижать требуемую дозировку наночастиц, уменьшать адсорбционные потери ПАВ и способствовать переходу нефтесмачиваемой поверхности в более гидрофильное состояние. Такие эффекты перспективны для карбонатов, но требуют контроля агрегации и повреждения проницаемости. В отличие от межфазного теста, керновое испытание должно показать, сохраняется ли преимущество при течении через поровую структуру.

С точки зрения близости к целевой минерализации выделяются несколько групп кандидатов. Составы, рассчитанные на рассолы выше 200 г/л и температуры до 120 °С, представляют наиболее близкую экспериментальную базу, хотя целевой уровень 350 г/л требует отдельного подтверждения [7]. Безщелочные смеси и АЕС-АРГ обладают перспективностью благодаря расширению солёностного окна и формированию микроэмульсий, но значительная часть данных остаётся лабораторной. Отдельные этоксилированные сульфонаты и амфотерные системы показали устойчивость в высокоминерализованных карбонатных условиях, однако их пригодность зависит от конкретной температуры и состава рассола.

Ранжирование кандидатов по степени близости к условиям минерализации около 350 г/л

Кандидат	Степень подтверждения	Преимущество	Основной риск	Обязательное следующее испытание
Составы для жёстких рассолов	Близкие условия: выше 200 г/л, до 120 °С	Солестойкость и сверхнизкое межфазное натяжение	Неравенство ионного состава целевой воде	Фазовая и керновая проверка при 350 г/л

Кандидат	Степень подтверждения	Преимущество	Основной риск	Обязательное следующее испытание
Безщелочные анионно-катионные и анионно-цвиттерионные смеси	Экстраполяционные и лабораторный	Регулируемое соотношение компонентов и высокая межфазная активность	Осаждение, адсорбция, зависимость от pH	Полный ионный скрининг и динамическая фильтрация
Этоксифирированные сульфаты и амфотерные ПАВ	Близкие карбонатные условия	Растворимость и устойчивость при высокой минерализации	Гидролиз и осаждение двухвалентными ионами	Термостатирование и анализ осадка
АЕС-АРГ и микроэмульсионные составы	Перспективный лабораторный	Микроэмульсия типа III и сверхнизкое межфазное натяжение	Сложное фазовое поведение и необходимость косурфактанта	Фазовая диаграмма, солюбилизация, вязкость и керн
ПАВ-полимерные и наноконпозиционные системы	Функционально перспективный	Контроль подвижности и изменение смачиваемости	Потеря фильтруемости и рост стоимости	Совместная проверка вязкости, перепада давления и нефтеотдачи

Таким образом, универсального «лучшего» класса ПАВ не выявляется. Для песчаников и карбонатов могут требоваться разные поверхностные свойства, а для карбонатов дополнительно важна способность сочетать изменение смачиваемости с низким межфазным натяжением. При проектировании оторочки показатель нефтеотдачи должен рассматриваться совместно с приемистостью, удерживанием, фильтруемостью и экономическим расходом реагента.

Ограничения, исследовательский пробел и направления дальнейшей работы

Основное ограничение доказательной базы заключается в несоответствии между целевой минерализацией и условиями большинства исследований. Полевые применения преимущественно проводились в песчаниках при более низких температуре и минерализации, тогда как высокотемпературные высокоминерализованные карбонатные коллекторы изучены существенно слабее [3][18]. Поэтому результаты для рассолов близкой, но не идентичной минерализации следует трактовать как основание для отбора, а не как подтверждение промышленной пригодности.

Показательны ограничения отдельных бетаиновых амфотерных систем. Для одного ПАВ сверхнизкое межфазное натяжение сохранялось до 153 700 мг/л, а для другого — до 229 000 ppm; оба значения ниже 350 г/л. Следовательно, высокая солестойкость таких соединений не означает достижения целевого диапазона [19][20]. Аналогично, модифицированные сульфатные и сульфонатные ПАВ нельзя допускать к дальнейшему скринингу без проверки: при 106 °C в морской воде были отмечены гидролиз и осаждение в присутствии двухвалентных ионов [11].

Для карбонатов сохраняются риски чрезмерной адсорбции, особенно при высокой жёсткости, а также несоответствия между межфазным тестом и фактической нефтеотдачей. Полимерные и нанокпозиционные системы добавляют риски несовместимости, роста вязкости, снижения фильтруемости и повреждения проницаемости. Поэтому отсутствие осадка в статической пробе не может считаться достаточным доказательством безопасности закачки.

Рациональный протокол дальнейшей работы должен включать последовательность из пяти этапов. Сначала фиксируют полный ионный профиль воды, температуру, давление и минералогию породы. Затем проводят скрининг классов ПАВ и их смесей по растворимости, фазовому поведению, критической концентрации мицеллообразования и динамическому межфазному натяжению. На третьем этапе оценивают адсорбцию, удерживание и изменение смачиваемости; для микроэмульсий добавляют сольubilизацию, вязкость и плотность. Далее проверяют совместимость с полимером и фильтруемость. Завершают процедуру испытания на керне и проектирование состава и размера оторочки с учётом жёсткости рассола и температуры [7].

Главный исследовательский пробел является одновременно методологическим и прикладным: не хватает сопоставимых испытаний, в которых один и тот же кандидат проверяется в рассоле с минерализацией около 350 г/л, при заданном содержании Ca^{2+} и Mg^{2+} , на релевантной породе и с последующей оценкой нефтеотдачи. До устранения этого пробела перечень кандидатов следует формировать по степени подтверждённости и риску, а не по одному рекордному значению межфазного натяжения.

Заключение

Подбор ПАВ для химического увеличения нефтеотдачи при минерализации воды около 350 г/л представляет собой задачу согласования химической устойчивости, межфазной активности и фильтрационной пригодности. Наиболее обоснованными направлениями являются составы для жёстких рассолов, безщелочные анионные и цвиттерионные смеси, этоксилированные сульфаты, амфотерные ПАВ, АЕС-APG, а также ПАВ-полимерные и нанокпозиционные системы.

Установлено, что сверхнизкое межфазное натяжение следует рассматривать как один из критериев, но не как самостоятельное основание для выбора. Для карбонатных коллекторов решающими могут стать изменение смачиваемости, ограничение адсорбции и сохранение проницаемости. Результаты для менее минерализованных рассолов имеют экстраполяционный статус, а даже близкие к целевым условия требуют проверки полного ионного состава и температурно-породного контекста.

Следовательно, научно и технологически оправдан не выбор универсального ПАВ, а поэтапный допуск кандидатов к верификации. Состав должен пройти испытания в фактическом или воспроизводимо моделируемом рассоле, затем проверку на породе и керне. Только такая последовательность позволяет отделить высокую лабораторную межфазную активность от реальной пригодности к заводнению при минерализации около 350 г/л.

Список литературы

1. Gbadamosi A., Junin R., Manan M. A., Agi A., Yusuff A. S. Обзор химических методов повышения нефтеотдачи: современные достижения и перспективы. *International Nano Letters*, 2019. SCID: 54.1/j3jbzwf8.
2. Sheng J. J. Современное состояние технологии повышения нефтеотдачи с применением поверхностно-активных веществ. *Petroleum*, 2015. SCID: 54.1/f6f24msf.

3. Kamal M. S., Hussein I. A., Sultan A. S. Обзор заводнения с применением поверхностно-активных веществ: фазовое поведение, удерживание, межфазное натяжение и промысловые применения. *Energy & Fuels*, 2017. SCID: 54.1/6hq5gwp4.
4. Massarweh O., Abushaikha A. S. Применение поверхностно-активных веществ для повышения нефтеотдачи: обзор последних достижений. *Energy Reports*, 2020. SCID: 54.1/3mpmb2hk.
5. Chegenizadeh N., Saeedi A., Xie Q. Наиболее распространенные поверхностно-активные вещества, применяемые при химическом повышении нефтеотдачи. *Petroleum*, 2016. SCID: 54.1/awcdbttt.
6. Chowdhury S., Shrivastava S., Kakati A., Sangwai J. S. Всесторонний обзор роли поверхностно-активных веществ в процессе химического повышения нефтеотдачи. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022. SCID: 54.1/hydt6nmq.
7. Tabary R., Bazin B., Douarche F., Moreau P., Oukhemmanou-Destremaut F. Заводнение с применением поверхностно-активных веществ в сложных условиях: на пути к использованию жестких рассолов и высоких температур. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, 2013. SCID: 54.1/d3fcjzpe.
8. Isaac O. T., Pu H., Oni B. A., Samson F. A. Поверхностно-активные вещества, применяемые в традиционных и нетрадиционных коллекторах для повышения нефтеотдачи: обзор. *Energy Reports*, 2022. SCID: 54.1/cfh9zpzp.
9. Zhang G., Yu J., Du C., Lee R. Разработка композиций поверхностно-активных веществ для заводнения с использованием ПАВ при очень низкой и очень высокой минерализации без щёлочи. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 2015. SCID: 54.1/222a423e.
10. Aoudia M., Al-Maamari R. S., Nabipour M., Al-Bemani A., Ayatollahi S. Лабораторное исследование алкилэфирсульфонатов для повышения нефтеотдачи высокоминерализованных карбонатных коллекторов: исследование на примере месторождения. *Energy & Fuels*, 2010. SCID: 54.1/cugjxzmu.
11. Zulkifli N. N., Mahmood S. M., Akbari S., Abdul Manap A. A., Kechut N. I., Elrais K. A. Оценка новых поверхностно-активных веществ для повышения нефтеотдачи в высокотемпературных коллекторах. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019. SCID: 54.1/ywv6zq2k.
12. Shahrabadi A., Daghbandan A., Arabiyoum M. Экспериментальное исследование процесса адсорбции комбинации поверхностно-активного вещества и наночастиц на поверхности карбонатной породы-коллектора при увеличении нефтеотдачи. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, 2022. SCID: 54.1/adpp3dme.
13. Bera A., Mandal A. Микроэмульсии: новый подход к повышению нефтеотдачи: обзор. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014. SCID: 54.1/kzjxu2zg.
14. Levitt D., Pope G. A. Выбор и скрининг полимеров для повышения нефтеотдачи, 2008. SCID: 54.1/xd6b6keuf.
15. Ge J., Wang Y. Повышение нефтеотдачи карбонатного коллектора с высокой температурой и высокой минерализацией с применением ПАВ. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2015. SCID: 54.1/7kgf2xdf.
16. Chen P., Mohanty K. K. Повышение нефтеотдачи из трещиноватых карбонатных коллекторов с нефтесмачиваемостью с помощью поверхностно-активных веществ: влияние низкого межфазного натяжения и изменения смачиваемости. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, 2015. SCID: 54.1/yvbqdx9s.
17. Wu Z., Yue X., Cheng T., Yu J., Yang H. Влияние вязкости и межфазного натяжения при заводнении поверхностно-активным веществом и полимером на нефтеотдачу высокотемпературных и высокоминерализованных пластов. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2013. SCID: 54.1/g8x62bgu.
18. Belhaj A. F., Elraies K. A., Mahmood S. M., Zulkifli N. N., Akbari S., Hussien O. S. Влияние концентрации поверхностно-активного вещества, минерализации, температуры и pH на адсорбцию поверхностно-активных веществ при химических методах повышения нефтеотдачи: обзор. *Journal of Petroleum Exploration and*

- Production Technology*, 2019. SCID: 54.1/fqft3bas.
19. Wang D. M., Liu C. D., Wu W., Wang G. Разработка поверхностно-активного вещества со сверхнизким межфазным натяжением для химического заводнения без щёлочи, 2008. SCID: 54.1/984yteau.
 20. Wang D., Liu C., Wu W., Wang G. Новые поверхностно-активные вещества, обеспечивающие сверхнизкое межфазное натяжение между нефтью и высокоминерализованной пластовой водой без добавок, 2010. SCID: 54.1/89ketug7.