

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела им. К.Турысова

Кафедра «Нефтяная инженерия»

Массина Майра Таласовна

Разработка научных основ по снижению вязкости нефти для повышения
нефтеотдачи пластов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 7M07202 – Нефтяная инженерия

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела им. К.Турысова

Кафедра «Нефтяная инженерия»

УДК 622.276.6

На правах рукописи

Массина Майра Таласовна

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

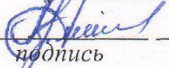
Название диссертации Разработка научных основ по снижению вязкости нефти для повышения нефтеотдачи пластов

Направление подготовки 7M07202 – Нефтяная инженерия

Научный руководитель

PhD

(ученая степень, звание)



Кабдушев А.А.

подпись

Ф.И.О.

" 21 " 06 2021г.

Рецензент

д.т.н., профессор, академик НАН РК

(ученая степень, звание)



Буктуков Н.С.

подпись

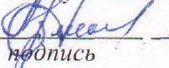
Ф.И.О.

" 10 " 06 2021г.

Нормоконтроль

PhD

(ученая степень, звание)



Кабдушев А.А.

подпись

Ф.И.О.

" 21 " 06 2021г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

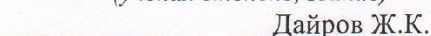
Заведующий кафедрой

Нефтяная инженерия

(наименование кафедры)

М.Т.Н.

(ученая степень, звание)



подпись

Ф.И.О.

" " 2021г.

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела им. К.Турысова

Кафедра «Нефтяная инженерия»

7М07202 – Нефтяная инженерия

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Нефтяная инженерия

_____ Дайров Ж.К.

“ _____ ” _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Массиной Майре Таласовне

(Ф.И.О. обучающегося)

Тема: Разработка научных основ по снижению вязкости нефти для повышения нефтеотдачи пластов

(тема магистерской диссертации)

Утверждена приказом Ректора Университета № 330 – М от “ 11 ” ноября 2021г.

Срок сдачи законченной диссертации “ _____ ” _____ 20__г.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Рассмотреть текущее состояние проблемы

б) Провести анализ различных методов снижения вязкости

в) Провести литературный обзор по исследуемой методике

г) Рассмотреть физические основы воздействия

д) На основе изученных данных разработать улучшенный метод воздействия на вязкость

Рекомендуемая основная литература:

1 Дыбленко В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – 80с.

2 Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы // Материалы международной научной конференции. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2017. – 138 с.

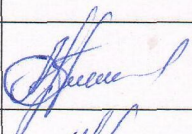
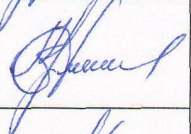
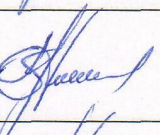
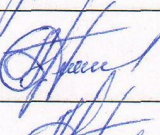
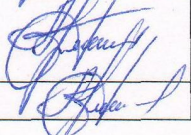
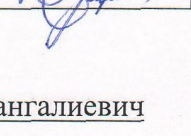
ГРАФИК

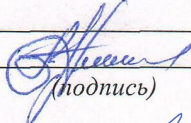
подготовки магистерской диссертации

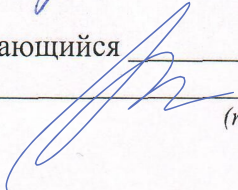
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Литературный обзор отечественных и зарубежных источников по ультразвуковой методике	21.05.2020	-
Теоретическая основа темы диссертации	07.01.2021	-
Проведение лабораторного эксперимента и предоставление отчета	30.05.2021	-

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Текущее состояние вопроса проблемы извлечения нефти	Кабдушев А.А., PhD	21.06.2021	
Современные методы увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов		21.06.2021	
Литературный обзор отечественных и зарубежных источников по ультразвуковой методике		21.06.2021	
Физический смысл применимости ультразвукового методов воздействия		21.06.2021	
Физико-математическое обоснование процесса		21.06.2021	
Проведение лабораторного эксперимента		21.06.2021	
Нормоконтролер		21.06.2021	

Научный руководитель _____ Кабдушев Арман Арстангалиевич
 (подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению обучающийся _____ Массина Майра Таласовна
 (подпись) (Ф.И.О.)

Дата

" 21 " ИЮНЯ 2021 г.

АННОТАЦИЯ

Создание новых комбинированных ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий интенсификации добычи нефти остаётся актуальной задачей не только в Казахстане, но и в целом по всему миру, учитывая стратегическое значение нефти для экономики большинства стран, для которых нефтяная промышленность является ключевой. Разработка таких технологий позволит, обеспечит существенную экономию материальных ресурсов, повышение экономической эффективности, снижение экологического воздействия на окружающую среду.

Магистерская диссертация на тему: «Разработка научных основ по снижению вязкости нефти для повышения нефтеотдачи пластов» представлена 6 разделами, в которых магистрантом были проведены литературный, теоретический анализы, а также проведены лабораторный эксперимент с целью подтверждения применимости данного метода.

ANNOTATION

The creation of new combined resource-saving and environmentally friendly technologies for the intensification of oil production remains an urgent task not only in Kazakhstan, but also in general around the world, given the strategic importance of oil for the economy of most countries for which the oil industry is key. The development of such technologies will allow, provide significant savings in material resources, increase economic efficiency, and reduce the environmental impact on the environment.

Master's thesis on the topic: "Development of scientific bases for reducing the viscosity of oil to improve oil recovery" is presented in 6 sections, in which the master's student conducted literary and theoretical analyses, as well as conducted a laboratory experiment to confirm the applicability of this method.

АНДАТПА

Мұнай өндіруді интенсификациялау үшін жаңа біріккен ресурстарды үнемдейтін және экологиялық таза технологияларды құру тек Қазақстанда ғана емес, бүкіл әлемде мұнай болып табылатын көптеген елдердің экономикасы үшін мұнайдың стратегиялық маңыздылығын ескере отырып, кезек күттірмейтін міндет болып қала береді. Өнеркәсіп шешуші болып табылады. Мұндай технологияларды дамыту материалдық ресурстарды үнемдеуге, экономикалық тиімділікті арттыруға және қоршаған ортаға қоршаған ортаға әсерін азайтуға мүмкіндік береді.

Магистрлік диссертация: «Мұнайды қалпына келтіруді арттыру үшін мұнай тұтқырлығын төмендетудің ғылыми негіздерін жасау» 6 бөлімде ұсынылған, онда магистрант әдеби, теориялық талдаулар өткізді, сонымен қатар зертханалық эксперимент оның қолданылуын растады әдіс.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1. Текущее состояние вопроса проблемы извлечения нефти	8
2. Современные методы увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов	9
2.1. Тепловые методы	10
2.2. Смешивающееся вытеснение	10
2.3. Заводнение химическими реагентами	11
3. Литературный обзор отечественных и зарубежных источников по ультразвуковой методике	13
3.1. Опыт применения метода ультразвуковых технологий на месторождениях Казахстана	20
4. Физический смысл применимости ультразвукового методов воздействия	22
4.1. Условия применимости ультразвукового воздействия в условиях месторождения	24
5. Физико-математическое обоснование процесса	26
6. Проведение лабораторного эксперимента	31
6.1. Проведение спектрального анализа	31
6.2. Ультразвуковая обработка	37
Заключение	41
Список литературы	42

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное падение добычи углеводородов составляет одну из серьезных проблем, поскольку мировой спрос на углеводороды постоянно растет. Следовательно, в приоритете разработка и применение новых методов, которые позволят добиться повышения производительности разработки месторождений. Снижение добычи может быть вызвано главным образом снижением естественного пластового давления; или повреждением пласта в прискважинной зоне. Повреждение пласта - это состояние, которое вызвано проникновением буровых растворов в пласт, отложением асфальтенов и парафинов, мелкими миграциями и т.д.

Повреждение пласта значительно снижает производительность скважины, и его неблагоприятное воздействие на показатели добычи неизбежно. Методы стимуляции, такие как разрыв пласта под высоким давлением и закачка кислоты, растворителей, часто используются для устранения повреждений пласта вокруг ствола скважины. Эти традиционные методы, как правило характеризуются дороговизной, требуют широкого спектра поверхностных сооружений, закрываются в скважине и являются причинами экологических проблем.

Поэтому поиск новых методов воздействия всегда имел решающее значение. Ультразвуковой метод - это недорогая и экологически чистая технология, которая нашла широкое применение в нефтегазовой промышленности, например, для контроля трубопроводов, измерения скорости жидкости и повышения нефтеотдачи пластов (IOR).

Целью выполнения диссертационной работы является:

Анализ и изучение влияния ультразвукового поля на реологические свойства вязких нефтей с целью повышения нефтеотдачи пластов. В данной работе конкретно рассматривается ультразвуковой метод воздействия.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Анализ и обобщение литературных источников и опыта
- Выявление основных закономерностей изменения химического и фазового состава высоковязких нефтей в ходе обработки электрофизическими способами методом ИК-спектроскопии.
- Экспериментальное исследование кинематической вязкости жидкости до и после акустического воздействия
- Физико-математическое обоснование процесса акустического воздействия

Научная новизна:

Теоретически изучено и экспериментально доказано снижение вязкости жидкости, ведущее к увеличению расхода жидкости

1 Текущее состояние вопроса проблемы извлечения нефти

В настоящее время нефть играет одну из самых заметных ролей в обеспечении энергией промышленного мира, и в перспективе ближайшего будущего нет оснований предполагать, что какой-либо другой крупный энергоресурс займет ее место. Высокий спрос на нефть и тенденция роста цен на нефть побудили нефтяные компании искать новые и более эффективные способы добычи нефти. Естественные движущие силы, влияющие на первичную добычу, такие как пластовое давление и гравитационные силы, обычно способствуют добыче некоторой доли исходной нефти, особенно в резервуарах с неблагоприятными условиями. После вторичной добычи, например заводнения, в таких резервуарах все еще может оставаться большое количество нефти. Для максимизации добычи нефти были внедрены различные методы повышения нефтеотдачи пластов. Они могут не подходить для каждого типа резервуаров из-за экономических или технических ограничений. Поэтому было предложено и даже опробовано в полевых условиях множество различных нетрадиционных методов.

Использование акустической энергии для стимулирования нефтяных пластов – это потенциальный метод, который на первый взгляд может показаться механическим стимулированием. Однако, в данный момент он требует проведения более глубоких исследований, чтобы раскрыть физику процесса и механизмов способствующих добыче нефти под воздействием акустической энергии. Существуют некоторые преимущества использования упругих звуковых волн для повышения нефтеотдачи пластов. Например, данный метод является экологически чистым и, с точки зрения рекуперации, является эффективным способом распределения энергии во всех направлениях в среде за счет его сферического воздействия. С другой стороны, его основным ограничением, является быстрое затухание высокочастотных волн в полостях пористых сред из-за более коротких длин волн.

2 Современные методы увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов

Повышенная нефтеотдача (EOR) обычно относится к методам, применяемым для снижения остаточной нефтенасыщенности после первичных и вторичных методов добычи. ЭОР считается третьей, а иногда и последней стадией добычи нефти, в прошлом называвшейся третичной добычей. В этих процессах скорость извлечения нефти зависит от конкретных характеристик каждого пласта. На самом деле резервуары, содержащие высоковязкие нефти, обычно вообще не реагируют на традиционные методы добычи.

Эффективность метода повышения нефтеотдачи пластов измеряется количеством нефти, которое может быть экономически извлечено по сравнению с количеством, полученным традиционными методами. Улучшенные процессы восстановления используют термические и химические эффекты и свойства фазового поведения для уменьшения или устранения капиллярных сил, которые задерживают нефть, разбавляя ее или изменяя ее подвижность. Эти процессы включают затопление водой, акустическое воздействие, закачку углеводородов, углекислого газа, заводнение полимерами и несколько термических методов.

Выбор метода зависит от свойств пластовых флюидов и характеристик породы пласта. Реологические свойства тяжелых нефтей и характеристики их коллекторов делают их добычу сложной задачей в нефтяной промышленности. Для тяжелых нефтей наиболее успешными являются термические методы.

Термические методы широко распространены в технологиях, используемых для производства тяжелых и сверхвязких нефтей. Тепловые методы являются наиболее передовым методом ЭОР из-за большого опыта в области испытаний и технологии, разработанной в течение многих лет (почти 6 десятилетий) их применения.

Тепловые методы основаны на подаче тепла в резервуар. Таким образом, повышение нефтеотдачи происходит главным образом за счет снижения вязкости нефти и, следовательно, за счет увеличения коэффициента подвижности. Тепло может подаваться в резервуар либо путем закачки пара или воды, а также путем создания фронта горения внутри резервуара и должно обеспечить экономически жизнеспособный поток нефти. Основными процессами, использующими термические методы для извлечения тяжелой нефти, являются паровые методы, такие как циклическое паровое стимулирование (CSS), закачка пара (SF) и гравитационный дренаж с помощью пара (SAGD), создания фронта горения (ISC) и затопление горячей водой. Однако существует большое разнообразие этих методов, которые включают совместное впрыскивание пара, растворителей и других газов.

2.1 Тепловые методы

Циклическая стимуляция пара (CSS) - это стратегия теплового производства, при которой пар закачивается в резервуар под высоким давлением и высокой температурой в течение длительного времени, которое может длиться до месяца. По истечении этого периода закачка прекращается, что обеспечивает насыщение и распределение тепла вдоль пласта, а следовательно, и разжижение нефти. Типичные коэффициенты извлечения для CSS составляют от 20% до 40% OOIP с соотношением пара/нефти от 3 до 5. Метод закачки пара может представлять коэффициент извлечения 60% OIP. Паровой гравитационный дренаж (SAGD) - это процесс термической добычи тяжелой нефти, применяемый к нескольким парам скважин, параллельным и вертикально выровненным. Процесс SAGD состоит из закачки пара в горизонтальную скважину, расположенную над параллельным горизонтальным добывающим устройством в той же вертикальной плоскости. После начального периода кондуктивного нагрева обеих скважин путем циркуляции пара в каждой из них пар непрерывно закачивается в верхнюю форсунку, в то время как нефть самотеком стекает в нижнюю добывающую скважину. SAGD может достигать коэффициентов извлечения до 55% OIP. SAGD привлекла внимание в странах с большими запасами тяжелой и сверхтяжелой нефти, особенно в Канаде и Венесуэле.

Создание фронта горения (ISC) - это тепловой метод в разработке, основанный на сжигании в скважине части нефти для обеспечения тепла и его мобилизации. В ISC газ, содержащий кислород, непрерывно впрыскивается в резервуар и воспламеняется при контакте с нефтью, создавая фронт горения, который распространяется по резервуару.

2.2 Смешивающееся вытеснение

Закачка смешивающегося растворителя является одним из методов, широко используемых для извлечения нефти из пористой среды, и состоит из закачки жидкости, которая растворяется или смешивается с нефтью. Среди используемых вариантов - органические растворители (жидкость или газ), поверхностно-активные вещества, химические добавки и полимеры. Первая жидкость вызывает смешивающееся вытеснение, поскольку смешиваемость является основным механизмом восстановления, в то время как последние характеризуются химическим заводнением. Углекислый газ был показан в качестве перспективного растворителя для легкой нефти, главным образом в сверхкритических условиях.

Смешиваемое вытеснение относится к процессам восстановления, в которых отсутствует граница между вытесняющей и вытесняемой жидкостями. Это означает, что межфазное напряжение между этими жидкостями равно нулю. В этом состоянии жидкости достигают полной

смешиваемости и могут перемещаться по пористой среде, аналогично однородной фазе. Смешиваемость зависит от химического сходства между жидкостями, их состава, температуры и давления.

Помимо описания фазового поведения, методы EOR, применяющие смешивающееся вытеснение, должны учитывать массоперенос между смещенной и вытесняющей фазами.

2.3 Заводнение химическими реагентами

Химическое заводнение включает в себя процессы закачки, в которых в качестве вытесняющей жидкости используются специальные химические растворы. Эти растворы обычно состоят из поверхностно-активных веществ, полимеров и щелочных соединений, которые предназначены для уменьшения коэффициента подвижности и т.д. При химическом заводнении добыча нефти увеличивается либо за счет улучшения характеристик закачиваемой воды, например, за счет добавления полимера, либо за счет увеличения эффективности вытеснения за счет образования мицелл поверхностно-активного вещества. Также используются эмульсии, пены и микробиологические вещества, хотя их влияние на EOR незначительно.

Поверхностно-активные вещества - это вещества, которые способны снижать межфазное натяжение нефть-вода, улучшая подвижность нефти и создавая пену и эмульсии. Поверхностно-активные вещества также могут взаимодействовать с породой коллектора, изменяя ее смачиваемость. Нефтяные сульфонаты являются наиболее часто используемыми поверхностно-активными веществами на нефтяных месторождениях. Процесс полимерного заводнения основан на закачке водорастворимых полимеров, состоящих из высокомолекулярных соединений. Полимеры способствуют увеличению вязкости воды и, следовательно, увеличивают сопротивление потоку, улучшая эффективность охвата пласта, в основном в областях с высокой проницаемостью. Полиакриламиды и полисахариды - это полимеры, наиболее часто используемые в операциях по увеличению нефтеотдачи пластов, поскольку они обеспечивают лучшую эффективность в улучшении коэффициента подвижности и снижении.

В то время как методы полимерного и щелочного заводнения считаются процессами средней сложности, заводнение поверхностно-активным веществом является одним из наиболее сложных методов повышения нефтеотдачи.

Основными ограничениями использования полимерного заводнения являются адсорбция полимера породой коллектора, разложение полимера и потеря приемистости. [3]

Выводы по главе 2

Очень трудно переоценить сложность разработки месторождений характеризующиеся тяжелой нефтью. Несмотря на возникающие вопросы по сложностям с сепарацией, транспортировкой, а также доставкой самой нефти на поверхность, имеется проблема, связанная с трудностями процесса притока нефти. Данный коллапс связан с блокировкой пор АСПО выпадающими из нефти и низкой текучестью.

На сегодняшний день известно достаточно много технологий разработки месторождений высоковязких нефтей, которые на практике доказали свою эффективность.

3 Литературный обзор отечественных и зарубежных источников по ультразвуковой методике

Многочисленные лабораторные исследования показали способность ультразвука воздействовать на остаточную нефть, повышать проницаемость пласта, а также нефтеотдачу.

В 2019 году Аги [4] исследовали роль критической концентрации мицелл (ККМ) во время одновременной операции воздействия ультразвуком и заводнения с использованием поверхностно-активных веществ, а также влияние ультразвука во время совместного проведения заводнения с целью повышения нефтеотдачи пластов с использованием песка в качестве пористой среды. Упаковка с песком была погружена в водную среду, чтобы создать подходящую среду для распространения ультразвуковых волн. Ими было отмечено, что заводнение водой с поверхностно-активными веществами дало дополнительную нефтеотдачу 11% и 12% соответственно из-за воздействия ультразвука (40 кГц и 500 Вт) во время операции. При заводнении поверхностно-активными веществами было видно, что основным механизмом повышения нефтеотдачи является образование микроэмульсий. Ультразвук также показал большую эффективность при высокой интенсивности ультразвука и при высокой концентрации поверхностно-активного вещества, превышающее критическую концентрацию мицелл (ККМ).

Другим исследованием этой команды был эксперимент по визуализации, проведенный с использованием двумерной стеклянной микромоделли, подвергнутой воздействию ультразвуковой энергии при 40 кГц и 500 Вт, для наблюдения разницы между прерывистым и непрерывным воздействием по добыче нефти [5]. В результате было выявлено, что прерывистое воздействие способствует большему извлечению нефти по сравнению с непрерывным во время ультразвуковой операции, а высокая интенсивность ультразвука показывает лучшие результаты для тяжелой нефти. Они пришли к выводу, что сочетание прерывистой сонификации высокой интенсивности и небольшого расстояния от источника энергии дает наилучший коэффициент извлечения нефти. Более надежные результаты можно было бы получить в результате испытаний, проведенных в условиях пласта.

Гамартале и др. [6] исследовали влияние стимуляции ультразвуковыми волнами на различные поровые структуры. Пять образцов карбоната и песчаника подвергались прерывистому воздействию с частотой 20 кГц и мощностью 300 Вт в течение 10 минут (7 секунд излучения и 3 секунды покоя) для оценки влияния ультразвуковых волн на поток. Результаты анализа с помощью петрографического и сканирующего электронного микроскопа (SEM) показали, что ультразвуковые волны могут изменять морфологию породы путем инициирования микроразлома и/или отрыва частиц породы. Создание микроразрыва предусмотрено для повышения проницаемости и повышения нефтеотдачи пластов; однако отрыв частиц может улучшить или

уменьшить проницаемость. Ими также было замечено, что ультразвук значительно увеличивает проницаемость образцов оолитового карбоната, но результаты, полученные из образцов песчаника, были спорными. Их результаты согласуются с некоторыми результатами микромоделных исследований Резаи Деншиби [7], в которых под воздействием ультразвука изучалось влияние различной геометрии и типа нефти на нефтеотдачу. В целом ультразвук улучшил нефтеотдачу, но это зависело от геометрии микромодел. Кроме того, больший эффект ультразвука наблюдался для нефтей с более низкой вязкостью.

Тан [8] и проектная команда пришли к выводу, что ультразвуковая мощность является наиболее важным фактором для извлечения нефти. Это согласуется с результатами эксперимента по влиянию частоты волн и выходной мощности на нефтеотдачу в процессе заводнения, стимулированном ультразвуком [9], где серия экспериментов была проведена на обычном пакете песка, насыщенном вазелином и керосином в качестве нефтяной фазы. Частоты (25, 40 и 65 кГц) и выходная мощность (50-500 Вт) волн варьировались в каждом эксперименте, таким образом изучалось влияние на нефтеотдачу. Результаты показали, что выходная мощность является наиболее значимым фактором, влияющим на добычу нефти. Увеличение выходной мощности (интенсивности) волн увеличивает добычу нефти, в то время как увеличение частоты волн ускоряет добычу нефти; тем не менее, конечная добыча нефти была одинаковой для волн разных частот. Например, применение ультразвука добавило 10%, 14% и 17% к извлечению нефти из вазелина при выходной мощности 100, 200 и 400 Вт соответственно. С другой стороны, при выходной мощности 100 Вт при времени обработки 200 мин восстановление волн 25 кГц составило 51% , тогда как для волн с частотой 40 и 65 кГц оно составило 53% и 57% соответственно.

В 2018 году Ванг [10] провели эксперименты по сравнению с целью снижения гидрофильности керна с помощью ультразвуковой волны, закачкой хим.реагентов и комбинации ультразвука и метода инъекции хим.реагентов. Общие результаты показали, что более низкая ультразвуковая частота и более высокая мощность могут повысить эффективность; однако со временем обработка становится менее перспективной, что указывает на то, что время обработки следует контролировать для достижения оптимального значения. Перед испытаниями были проверены ультразвуковые условия и использованы оптимальные условия (30 кГц, 1000 кГц) для обработки образцов керна ультразвуком. Хотя химическая инъекция сама по себе выполняется слабее, чем применение ультразвуковых волн для улучшения проницаемости керна, стоимость и безопасность ультразвука могут оказаться более перспективными.

В целом, метод комбинации ультразвука и закачки химических веществ оказал лучший эффект, чем использование только ультразвуковой обработки или закачки химических веществ. Ультразвукохимический метод способствовал большей проницаемости, чем два других метода. Аналогичные

результаты наблюдались в исследовании (сравнение ультразвуковой обработки при 20 кГц и 1000 Вт, химической инъекции и комбинированной обработки ультразвуком) Хана [11].

Исходя из вышеизложенных исследований, имеет смысл сказать, что развитие ультразвуковой технологии не является необходимым для замены существующего набора методов, вместо этого они могут дополнять их для лучшего восстановления.

Ван и др. [12] изучали влияние ультразвука на снижение вязкости сверхтяжелой нефти. Начальная вязкость сверхтяжелой нефти составляла 1250 МПа*с. Был испытан диапазон частот волн 18 кГц — 25 кГц и выходная мощность 100 Вт – 1000 Вт. Ультразвук на частотах 18, 20 и 25 кГц снижал вязкость нефти до 480, 890 и 920 МПа*с соответственно, хотя время излучения влияло на эти изменения. Их результаты также показали, что кавитация, генерируемая ультразвуковым излучением, может расщеплять большие тяжелые молекулы сверхтяжелой нефти на легкие углеводородные вещества. Кроме того, был сделан вывод, что основными значимыми параметрами для снижения вязкости тяжелой нефти являются частота ультразвука, мощность и время излучения.

Муллагаев и др. [13] изучали влияние ультразвуковой обработки на вязкость и температуру застывания сырых нефтей с различными составами в отношении н-алканов и смоло–асфальтеновых компонентов. Образцы нефти подвергались ультразвуковой обработке с использованием преобразователя, работающего на резонансной частоте 24,3 кГц, и генератора мощностью 4000 Вт. Обнаружено, что производительность ультразвуковой обработки зависит от состава нефти и времени ультразвуковой обработки. Они предположили, что ультразвуковая обработка парафиновых нефтей с высоким содержанием смолы и асфальтена приводит к значительному снижению вязкости и температуры застывания, а эффективность ультразвуковой обработки увеличивается с увеличением времени обработки. Этот вывод согласуется с экспериментальным результатом экспериментальных данных Рахими [14] и Алиева [15], где обработка ультразвуковым облучением существенно снизила вязкость сверхтяжелой нефти. Муллагаев [13] также пришли к выводу, что ультразвуковая обработка не подходит для сырых нефтей с высоким содержанием н-алканов, так как увеличение времени ультразвуковой обработки приводит к значительному ухудшению вязкостно-температурных характеристик из-за увеличения кристаллизации высокомолекулярных н-алканов.

В некоторых других исследованиях Надери и Бабадагли [16,17] провели различные тесты на капиллярное впитывание образцов горных пород и визуальных микромоделей для анализа влияния ультразвука на нефтеотдачу и взаимодействие флюида с породой при различных условиях смачиваемости. Они обнаружили, что ультразвук влияет на относительную проницаемость породы по-разному.

Мусави и др. [18] изучили реологическое поведение ряда образцов

сырой нефти, стимулированных ультразвуком, в различные интервалы времени. Кроме того, они исследовали влияние температуры на изменение вязкости образцов тяжелой нефти с помощью нескольких экспериментов с установившимся и колебательным сдвиговым потоком. Исследование показало, что тяжелые компоненты растворялись в сырой нефти в результате ультразвукового воздействия (ультразвуковая стимуляция с частотой 45 кГц). После ультразвукового излучения один из сырых образцов показал псевдопластическое поведение жидкости. Было отмечено, что существует оптимальное время ультразвуковой обработки, необходимое для эффективного снижения вязкости сырой нефти и оптимального предотвращения флокуляции осадков в асфальтеновой сырой нефти. Для сырой нефти Kouh-e-Mond было установлено, что оптимальное время воздействия составляет примерно 40 минут. В ходе исследования авторы пришли к выводу, что ультразвуковые волны способны разрушать тяжелые коллоидные компоненты сырой нефти, а разрушение молекул асфальтена возможно только при определенной продолжительности ультразвукового облучения. Кроме того, эксперимент с температурной разверткой показал, что повышение температуры олеиновой фазы в результате ультразвука не является основной причиной реологических изменений сырой нефти. Эти изменения можно объяснить самими ультразвуковыми волнами. Влияние на вязкость сырой нефти Kouh-e-Mond становится значительным, когда образец обрабатывается ультразвуком до 40 мин. Эта информация может иметь очень важное значение для исследований в полевых условиях в случае например для резервуаров с тяжелой нефтью, где присутствие асфальтенов проблематично.

Мохаммадян и др. [19] провели несколько тестов на заводнение с помощью ультразвука, чтобы исследовать влияние ультразвука на скорость извлечения нефти и механизмы ее регулирования. Использовался пакет кварцевого песка, который подвергался воздействию ультразвукового излучения 40 кГц мощностью 100-500 Вт. Было сделано заключение, что основными механизмами, способствующими этому, являются кавитация, снижение вязкости и эмульгирование.

Аналогичные результаты были получены в исследованиях Hamidi et al. [20], в которых тщательно изучалось влияние ультразвука на падение давления и изменение вязкости олеиновой фазы в пористой среде. Они протестировали диапазон ультразвуковых частот и мощности с различными типами нефти и выяснили, что тепловыделение, кавитация и снижение вязкости являются наиболее вероятными механизмами, которые следует учитывать при использовании методов повышения нефтеотдачи с помощью ультразвука.

В результате проведенного исследования Палаева [21] можно сделать следующие выводы: ультразвуковое воздействие на нефть оказывает больший эффект снижения вязкости, чем термический нагрев или комбинированный эффект нагрева и ультразвуковой обработки.

Вышеизложенная информация также представлена в виде таблицы

(Таблица 1) для более простого ориентира в описанных исследованиях.

Таблица 1 – Литературный обзор зарубежных и отечественных источников

Руководитель	Полученные эффекты от применения ультразвукового метода воздействия	Диапазон частот	Диапазон интенсивности	Продолжительность воздействия
Аги [4], [5]	При прерывистой обработке ультразвуком извлекается больше нефти по сравнению с непрерывной обработкой ультразвуком.	40 кГц	500 Вт	3 – 90 мин
Гамартале [6]	Ультразвук может изменить морфологию коллектора путем инициирования микротрещин и/или отслоения частиц породы.	30 кГц	100 Вт	
Резайи Деншиби [7]	Ультразвук улучшил нефтеотдачу, подвижность нефти и, в следствие, продвижение нефти. Но это зависело от геометрии пор.	30 кГц	100 Вт	
Тан [8]	Большой эффект наблюдался для нефтей с более низкой вязкостью. Ультразвуковая мощность была наиболее значимым фактором для извлечения нефти по сравнению с другими параметрами, такими как частота, время, температура и pH.	25 - 125 кГц	120 – 300 Вт	15 – 120 мин
Мохаммадиан [9]	Ультразвуковая мощность оказывает наибольшее влияние на добычу нефти по сравнению с ультразвуковой частотой.	25, 40 и 65 кГц	50 – 500 Вт	

Ванг [10]	Метод комбинации ультразвука и химических веществ оказал лучший эффект для удаления чувствительности к воде, чем использование только ультразвуковой обработки или химической инъекции.	30 кГц	1000 Вт	
Кхан [11]	Метод комбинации ультразвука и хим. веществ оказал лучший эффект, чем использование ультразвуковой обработки или инъекции химических веществ.	20 кГц	1000 Вт	
Ванг [12]	Наиболее важными факторами для снижения вязкости тяжелой нефти являются частота, мощность и время воздействия.	18 – 25 кГц	100 – 1000 Вт	5 – 30 мин
Муллакаев [13]	Эффективность ультразвуковой обработки сырой нефти зависит от состава.	24,3 кГц	4000 Вт	До 15 мин
Алиев [14]	Ультразвуковая стимуляция снизила вязкость и улучшила показатели переработки сверхтяжелой нефти с месторождения “Ачалча”.	24 кГц	200 Вт	От 30 с до 30 мин
Рахими [15]	Ультразвук снизил вязкость сверхтяжелой сырой нефти за 10 мин оптимального времени облучения.	20 кГц	100 Вт	10 мин

Надери и Бабадагл и [16]	После прорыва в моделях со смачиваемостью по нефти, ультразвук был эффективен, в то время как в моделях по воде, эффект ультразвука был незначительным в отношении коэффициента извлечения.	20 – 40 кГц	35 – 250 Вт/см ²	
Надери и Бабадагл и [17]	Скорость восстановления увеличивается, но общее восстановление остается прежним.	22 – 40 кГц	От 45 до 84 Вт/см ²	
Мусави [18]	Ультразвук способствовал растворению тяжелых компонентов в сырой нефти.	45 кГц	72 Вт	5 – 240 мин
Мохаммадиан [19]	Сделан вывод, что механизмами, способствующими извлечению нефти за счет ультразвука, являются кавитация, снижение вязкости и эмульгирование.	40 кГц	100 – 500 Вт	
Хамиди [20]	Наблюдаемым эффектом повышения нефтеотдачи пластов является кавитация, тепловыделение и снижение вязкости, вызванные ультразвуком.	25, 40 и 68 кГц	150, 200 и 500 Вт	60 мин
Палаев [21]	Ультразвуковое воздействие на нефть оказывает больший эффект снижения вязкости, чем термический нагрев или комбинированный эффект нагрева и ультразвуковой обработки.	23 кГц	1000 Вт	0,5 – 1 мин

3.1 Опыт применения метода ультразвуковых технологий на нефтях месторождений Казахстана

По имеющимся в открытом доступе исследованиям опыт применения ультразвуковых технологий на месторождениях упоминается в малом количестве работ и статей

Так, в работе Ершова М.А. и Муллакаева М.С. [22] снижение вязкости нефти проводилось ультразвуковым методом, с добавлением химических реагентов.

Лабораторные испытания проводились на нефтях следующих характеристик приведенных в Таблице 2.

Таблица 2 – Групповой состав исследуемых образцов нефтей

Месторождение нефти	Динамическая вязкость, при 20С, мПа*с	Содержание, % мас.		
		Парафины	Смолы	Асфальтены
Восточный Жетыбай	575	28,3	19,3	3,8
Ащисай	360	18,9	15,2	4,0
Кырыкмылтык	8159	5,5	25,9	6,6

В качестве реагентов в опытах использовались ксилол, толуол, бутилацетат, гексан и газоконденсат.

Наибольшее снижение вязкости нефти удается достичь при совместном воздействии УЗ и химического реагента при:

- для нефти месторождения Восточный Жетыбай при обработке с интенсивностью 12Вт/см² в течении 1 минуты и введении 2% ксилола удалось снизить динамическую вязкость на 44%, а при введении 2% бутилацетата – на 38%;
- для нефти Ащисая, с той же интенсивностью в течение 15 секунд и введении 2% бутилацетата удалось снизить вязкость на 42%, а при введении 2% толуола – на 35%;
- ультразвуковое воздействие на нефть месторождения Кырыкмылтык показало меньшую эффективность по сравнению с другими нефтями.

Выводы по разделу 3.

Результаты многочисленных исследований воздействия физическими методами на структурно-механические свойства нефтяных систем достаточно противоречивы. Однако можно констатировать, что физико-химические методы воздействия на нефти приводят к разрушению межмолекулярных связей, что позволяет улучшить их вязко-температурные свойства и открывать дорогу для практической реализации этих методов в промышленности.

На основе некоторых рассмотренных работ, можно сделать небольшой вывод о том, что сам метод ультразвукового влияния на призабойную зону как таковой, именно в данных кейсах, может быть и не есть самый результативный, однако использование его в комбинации совместно с химическими, тепловыми и гидродинамическими методами очень даже перспективно. Т.е. его можно охарактеризовать как отличный дополнительный катализатор, для снижения вязкости вязких нефтей и в последующем увеличения нефтеотдачи.

4 Физический смысл применимости ультразвукового методов воздействия

Акустические методы увеличения нефтеотдачи основаны на различных физических процессах, которые создаются и так или иначе протекают в призабойной зоне под воздействием ультразвука. Изучение данных процессов дает возможность выявить главные физические механизмы ультразвукового воздействия, основным из которых есть нелинейное взаимодействие акустической волны с жидкостью, которая заполняет некоторое пористое пространство рассматриваемого коллектора.

Мощное волновое излучение, которое создается специальным погружным устройством, распространяется в призабойной зоне скважины. Поровое пространство нефтяного пласта составляет большое множества различного размера объема капилляры, трещин, каналы, которые соединяют все полости, таким образом обеспечивая переток жидких флюидов. Основной целью процесса ультразвукового воздействия на призабойную зону скважины является в первую очередь стимуляция движения флюидов с целью увеличения увеличения нефтеотдачи. По типу воздействия есть способы, направленные на декольматацию нефтяного коллектора. Также имеются способы, нацеленные на силовые возможности забора флюидов путем воспроизведения оптимальных условий способствующих всасыванию при помощи эффекта акустического течения или увеличения пористости пласта. Также ультразвуковое излучение применяется с целью термического нагрева некоторых участков призабойной зоны, а также вкупе с хим.реагентами. [23]

Применительно к тяжелой сырой нефти явление акустической кавитации запускает химические реакции, которые разрушают высокомолекулярные соединения, связанные с ее резким схлопыванием пузырьков в жидкости. Согласно Стритеру, эти пузыри образуются в областях, где давление понижено и равно давлению пара. Для этого требуется концентрация энергии в жидкости.

Акустическая кавитация возникает, когда ультразвуковые волны распространяются в жидкости. Поскольку продольные волны распространяются с определенной частотой колебаний, они вызывают колебания молекул и создают циклы расширения и сжатия в жидких частицах, что отражается в колебаниях давления (высокое и низкое давления). В областях, где создается низкое давление, существует большая вероятность образования кавитационных пузырьков. Эти пузырьки поглощают энергию волн и увеличиваются в размерах до тех пор, пока не теряют способность эффективно поглощать энергию. Следовательно, окружающая жидкость оказывает сильное сжатие, потому что внешнее давление намного выше, чем то, что вызывает сжатие пузыря. Этот взрыв - это то, что создает идеальные условия температуры и давления, способствующие химическим реакциям. Кавитационные пузыри локализованно выделяют энергию за счет выброса ударных волн. За то короткое время, что длится коллапс кавитационного

пузырька, достигаются значительно высокие температуры и давления. На рис. 1 показано графическое изображение акустического явления, связанного с динамикой кавитационных пузырьков. [24]

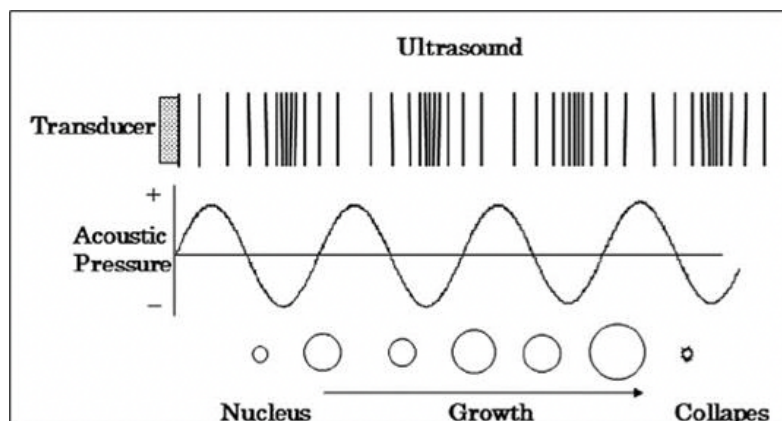


Рисунок 1 – Акустическое влияние на кавитационные пузырьки

С точки зрения механизма, лежащего в основе повышения нефтеотдачи с помощью ультразвука, были представлены различные гипотезы;

- изменение смачиваемости: высокочастотные волны вызывают вибрацию горных пород и флюидов. Однако скорость вибрации и ускорение горных пород и флюидов различны, поэтому они могут привести к смещению границы раздела флюида и породы и в результате сила притяжения между жидкостью и породой ухудшается, и жидкость отрывается от поверхности породы,
- снижение вязкости: порода подвергается вибрации от воздействия ультразвуковой волны, которая вызывает периодическое изменение напряжения сдвига и акустического давления. Для жидкостей, разжижающих при сдвиге, таких как некоторые тяжелые углеводороды, вязкость жидкости уменьшается с увеличением напряжения сдвига. Кроме того, тепло, выделяемое из-за ультразвуковой вибрации, может привести к снижению вязкости. Это связано с тем, что акустическая волна поглощается породой, в результате чего звуковая энергия преобразуется в тепловую энергию. Кроме того, кавитация высвобождает много тепловой энергии в процессе коллапса пузырьков,
- снижение поверхностного натяжения: в результате нагревающего эффекта ультразвука,
- деагуляция крупных молекул углеводородов: это может быть вызвано рядом причин, таких как кавитация пузырьков, трение и механическое воздействие ультразвука. Механическая вибрация от высокочастотных волн вызывает относительное движение различных молекул из-за различий в их ускорении, что приводит к разрушению тяжелых молекул (Рис.2). Этот эффект наряду с кавитационными эффектами вызывает

снижение вязкости тяжелой нефти, что подталкивает дополнительную нефть к стволу скважины,

- улучшение пористости и проницаемости в результате деформации пор, удаления мелких пробок, растворения парафина и асфальтенов и т.д.,
- слияние капель нефти в результате сил Бьеркнеса, что приводит к непрерывному потоку нефти. Кроме того, ультразвук вызывает движение капиллярно захваченных капель нефти, вызванное энергией, производимой кавитацией и механической вибрацией в породе и жидкостях
- перистальтический перенос: механические колебания могут привести к деформации стенок пор, что от сжатия приводит к перетoku жидкостей в соседние поры, таким образом создавая перистальтический перенос [25]

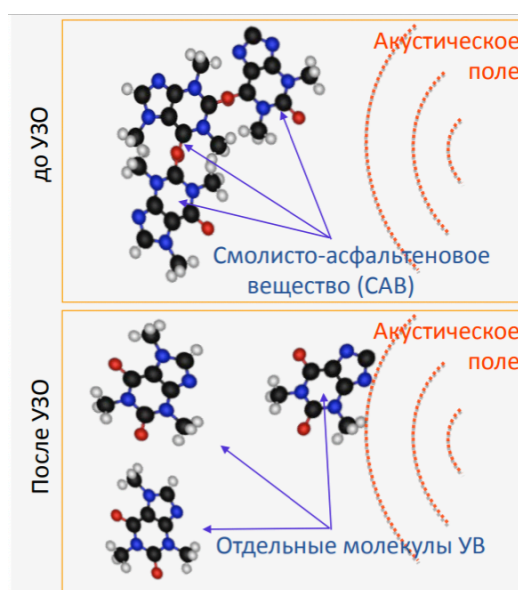


Рисунок 2 – Разрушение тяжелых молекул УВ

4.1 Условия применимости ультразвукового воздействия в условиях месторождения

Основываясь на проведенном обзоре отечественных и зарубежных литературных источников, а также результатах опытно-промысловых испытаний, Муллакаевым М.С. и др. были сформированы базовые критерии, которым должны соответствовать основные параметры пластовой нефти и геолого-физические параметры рассматриваемой скважины претендента для использования оборудования и технологии ультразвукового воздействия[2] (табл. 3).

Таблица 3 - Требования к скважинам-кандидатам для ультразвуковой

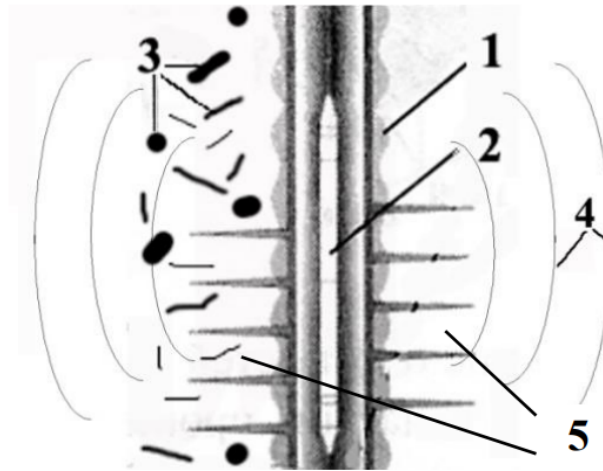
обработки

Параметр	Значение
Пласт	
Порода	Песчаник
Проницаемость, мкм ²	> 0,25
Пористость, %	> 20
Глинистость, %	≤ 15
Мин. мощность перфорированного пропластка, м	3
Количество пропластков в интервале перфорации;	≤ 10
Нефтенасыщенность пластов, %	> 50
Температура на забое, °С	10 - 135
Давление на забое, атм	40 - 400 атм.
Пластовое давление	$P > P_b$ на 15-20 %
Нефть, пластовая жидкость	
Динамическая вязкость в пластовых условиях, мПа×с	≤ 25
Температура начала кристаллизации парафина	Меньше забойной и пластовой температур
Не применимо при наличии газовой фазы в пласте	
По параметрам работы добывающих скважин	
Текущий дебит, м ³ /сут	≥ 3
Текущая обводнённость, %	≤ 75
Падение дебита за последние 1–2 года, не связанное с падением пластового давления или какими-либо техническими причинами	В 2 и более раз
По параметрам работы нагнетательных скважин	
Текущая приемистость, м ³ /сут	≥ 20
Падение приемистости за последние 1–2 года, не связанное с какими-либо техническими причинами	В 2 и более раз
Давление закачки	≥ $P_{project}$

5 Физико-математическое обоснование процесса

Акустическая волна имеет сферический (в случае точечного источника) или цилиндрический (для протяжённой нитевидной генерации) фронт.

На рисунке 3 показана схема взаимодействия ультразвука с пористой структурой нефтяного пласта при акустической стимуляции скважин.



1 – цементный камень; 2 – погружное устройство; 3 – пористая структура пласта; 4 – фронт перемещающейся акустической волны; 5 – перфорационные каналы

Рисунок 3 – Схема взаимодействия ультразвука с пористой структурой нефтяного пласта при акустической стимуляции скважин

Расчёты по взаимодействию ультразвука с жидкостью, находящейся в каналах, трещинах, капиллярах, порах призабойной зоны скважины, рассмотрены для одномерной плоской ультразвуковой волны, длина которой λ существенно превышает радиус тех каналов.

При описании распространения акустической волны в твердотельном материале структуры пласта необходимо исходить из уравнения упругости, учитывающего его вязкость и теплопроводность, для вектора U соответствующего смещения:

$$\rho_0 \partial_{tt}^2 U = \left[\rho_0 * (c_l^2 - c_t^2) + \zeta_0 + \frac{\eta_0}{3} \right] \nabla \operatorname{div} U + (\rho_0 * c_t^2 + \eta_0) \Delta U - \frac{E * \alpha}{3(1-2*\sigma)} * \nabla T \quad (1)$$

и уравнения теплопроводности в твёрдом теле для температуры:

$$C_V \partial_t T + \frac{c_p - c_v}{\alpha} * \partial_t \operatorname{div} U = \chi * \Delta T \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность материала, c_l и c_t – скорости продольных и поперечных колебаний в твёрдом теле; E и σ – упругие модули; C_p и C_v – теплоёмкости при постоянном давлении и объёме соответственно; ζ_0 и η_0 – коэффициенты первой и второй вязкости; χ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплового расширения материала.

Если направление распространения акустической волны выбрать вдоль оси z , а источник излучения поместить в начало координат $z = 0$, то граничное условие для смещения U продольной волны будет представлено следующим равенством:

$$U(z = 0, t) = U_m \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

где U_m – амплитуда смещения на выходе источника излучения; ω – частота колебаний источника.

Когда акустическая волна встречает на своём пути полость, заполненную жидкостью с плотностью ρ , она через колебания стенок вызывает появления соответствующих возмущений в жидкой среде, характеризуемых скоростью v . Система уравнений Навье-Стокса для таких возмущений состоит из двух уравнений. Одно из них представляет собой соотношение непрерывности:

$$\partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho v) = 0 \quad (4)$$

Другое представляет собой уравнение движения жидкости:

$$\partial_t v + (v \nabla) v - \mu \Delta v = -\frac{\nabla p}{\rho} \quad (5)$$

$$v = \frac{[3\zeta + 4\eta]}{3\rho} \quad (6)$$

где p – давление в жидкости; μ – динамическая вязкость.

В рамках предложенной модели, прежде всего, следует рассчитать поведение вектора смещения $U(z, t)$ при удалении от источника излучения. Для этого решение линейной системы (1) – (2) можно искать в комплексной форме, учитывающей продольный характер колебаний и их затухание при распространении в твердотельной структуре пласта:

$$U(z, t) = U_m \exp(-i\omega t + ikz - kz) \quad (7)$$

где,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

κ – пространственный декремент, создаваемый теплопроводностью и вязкостью материала твердотельной субстанции.

Используя представление (7) для смещения и температуры, претерпевающей изменения в результате внешнего воздействия, из уравнений (1) – (2) можно получить следующее выражение для декремента пространственного затухания:

$$\kappa = \frac{\omega^2}{2\rho_0 * c_t^2} * \left[\left(\frac{4}{3} \eta_0 + \zeta_0 \right) + \frac{\alpha^2 * \chi * T * \rho_0^2 * c_l^2}{3 * C_p^2} * \left(1 - \frac{4c_t^2}{3c_l^2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Частота ω при этом оказывается связанной с длиной продольной волны известным дисперсионным соотношением

$$\omega = k * c_l \quad (10)$$

При выводе формулы (9) учитывалась адиабатичность процессов, протекающих при распространении ультразвуковой волны, когда справедливо известное термодинамическое соотношение:

$$C_p - C_v = \alpha^2 * T * \rho_0 * c_l^2 * \left(1 - \frac{4c_t^2}{3c_l^2} \right) \quad (11)$$

и использовалось следующее равенство, вытекающее из определения продольной и поперечной скоростей через модули упругости:

$$\frac{E}{1-2\sigma} = 3\rho_0 * c_l^2 * \left(1 - \frac{4c_t^2}{3c_l^2} \right) \quad (12)$$

Для расчёта воздействия ультразвука на свойства жидкости будем исходить из уравнения Навье-Стокса (5), написанного как для стационарного со скоростью v её движения, так и для быстрых её осцилляций под воздействием ультразвука, происходящих с известной частотой $\omega = 2\pi f$ и скоростью u , зависящей от задаваемой амплитуды ξ ультразвуковых колебаний:

$$\overline{(u\nabla)u} = \nabla p + \mu * \Delta v \quad , \quad (13)$$

$$\rho * \partial_t * \mathbf{u} = i\mathbf{k} * p_0 * e^{-i\omega t + i\mathbf{k}r} + \mu * \Delta \mathbf{u} \quad , \quad (14)$$

$$\xi = \frac{k * p_0}{\rho * \omega^2} \quad (15)$$

где k – волновой вектор ультразвуковых колебаний, связанный с их длиной волны в жидкости соотношением

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (16)$$

p_0 – амплитуда высокочастотного давления, представляющая собой ту часть устанавливаемой ультразвуковым генератором величины, которая, согласно (7), дошла до рассматриваемой полости в уменьшенном из-за диссипации виде; p – стационарное давление, создаваемое внешними силами; r – пространственный вектор - координата, а черта сверху означает усреднение по времени за период колебаний

$$T_S = \frac{2\pi}{\omega} \quad (17)$$

Из формулы (2) можно найти пространственный декремент затухания ультразвука в жидкости κ_S , описываемый соотношением:

$$\kappa_S = \frac{k^2 * \mu}{\rho * \omega} = \frac{\omega * \mu}{\rho * s^2} \quad (18)$$

где s – скорость распространения ультразвуковой волны в жидкости; μ – динамическая вязкость. Для вязких жидкостей:

$$\kappa \ll \kappa_S \quad (19)$$

В качестве приоритетной задачи рассмотрим, как изменяется формула течения Пуазейля при ультразвуковом воздействии на жидкость в цилиндрической полости радиусом R и перепадом давления Δp на её концах. Будем считать, что координата z направлена вдоль оси цилиндра и длину этой трубы обозначим через L . Это означает, что для стимулирующей акустической волны, падающей под углом β к этой оси, вместо волнового числа k надо использовать проекцию волнового вектора $k \cos \beta$ на эту ось. Рассмотрим случай, когда $k_R \ll 1$ и $\kappa \ll \kappa_S$. Тогда из (10) можно записать:

$$v = \left\{ \frac{\Delta p}{L} + \rho * \xi^2 * \omega^2 * \kappa \right\} * \frac{1}{4\mu} * (R^2 - r^2) \quad (20)$$

Для определения расхода флюида Q можно записать следующую формулу (φ – азимутальная переменная в цилиндрической системе координат):

$$Q = \rho \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} d\varphi v = \frac{\pi * R^4 * \rho}{8\mu} * \left\{ \frac{\Delta p}{L} + \rho * \xi^2 * \omega^2 * \kappa \right\} \quad (21)$$

Как видно из (21), ультразвук эффективно увеличивает текучесть жидкости, повышая её расход. Разделяя течение на спонтанное и

вынужденное, связанное с ультразвуковым воздействием, части, выражение (21) можно записать в следующем виде:

$$Q = Q_0 + Q_S \quad , \quad (22)$$

$$Q_0 = \frac{\pi * R^4 * \rho}{8\mu} * \frac{\Delta p}{L} \quad , \quad (23)$$

$$Q_S = \frac{\pi * R^4 * \rho^2 * \xi^2 * \omega^2 * \kappa}{8\mu} \quad (24)$$

Формулу (24) можно переписать иначе, вводя эффективную вязкость $\mu_{\text{эфф}}$, учитывающую влияние ультразвука в форме, которая позволяет сохранить стандартный вид формулы Пуазейля, в которой вместо μ фигурирует $\mu_{\text{эфф}}$:

$$Q = Q_0 * \frac{\mu}{\mu_{\text{эфф}}} \quad , \quad (25)$$

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{\mu}{1 + \frac{Q_S}{Q_0}} \quad (26)$$

Из (26) видно, что эффективная вязкость всегда меньше того значения, которое свойственно невозмущённой жидкости, т.е. всегда

$$\mu_{\text{эфф}} < \mu \quad (27)$$

Это указывает на увеличение переноса жидкости в присутствии ультразвука. [28]

6 Проведение лабораторного эксперимента

6.1 Проведение спектрального анализа

В диссертации представлены результаты экспериментальных исследований, включающих обработку нефти и водонефтяных эмульсий месторождения Узень в водной среде при комнатной температуре. Общий вид экспериментального модуля включает сосуд, наполненный смесью нефти и воды, электродов воздействия и преобразователя. Метод ИК-спектроскопии используется с целью определения и дальнейшей фиксации изменений в структурно-групповом составе нефтей. Растворы исследуемых образцов нефтей и асфальтенов наносили на пластины из KBr ($C_{19}H_{12}Br_2O_5S$, красный бромфенол). [26]

При проведении спектрального анализа, в работе показано, что использование внешних воздействий приводит к изменению химического состава нефти. Управление результатами химических реакций достигается подбором электродов воздействия и схемы преобразования.

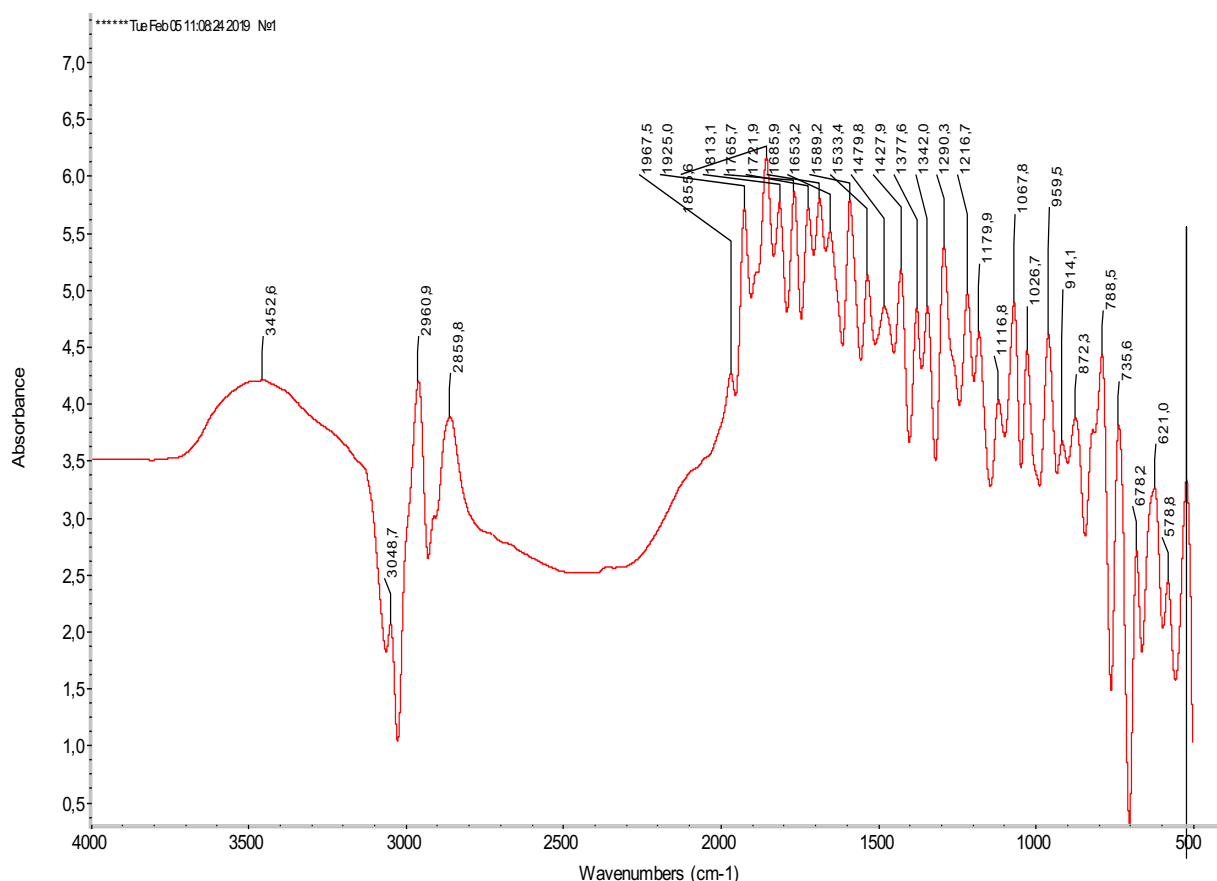


Рисунок 4 – ИК-Спектральный состав исходной водонефтяной эмульсии

Таблица 4 – ИК-спектры исходной водонефтяной эмульсии

месторождения Узень скв. X

Частота, см ⁻¹	Интенсивность	Тип колебаний	Вид соединения
1	2	3	4
3452,6	Пер.	Валентные О-Н	Межмолекулярная связь: димеры
3048,7	Сл.	Вал. Неуст. NH ₃ ⁺	Хлористоводородные соли, аминокислоты NH ₃ ⁺ -(CH ₂) _n CO ₂ HCL ⁻
2960,9	Ср.	Вал. С-Н	-CH ₃
2859,8		Вал. С-Н	-CH ₂
1967,5-1721,9		Вал. О -Н	Внутримолекулярн. связь
1685,9		Вал. С=О	Хиноны: две группы СО в одном и том же цикле
1653,2		Вал. С=О	Хиноны: две группы СО в разных циклах
1589,2		Вал. С=О	-CO-CH ₂ -CO- (енольная форма)
1533,4		Составн. частоты деформацион. кол. NH и вал. кол. C-N	Вторичные ациклические амиды
1479,1		Si-C	Кремниорг. соединений., Si фенил
1427,9	Ср.	Др.	Алифатические альдегиды
1377,6	-//-	-//-	-//-
1342,0	-//-	-//-	-//-
1290,3	С.	др.	Твердые жирные кислоты -CO ₂ H
1216,7	С.	др.	Твердые жирные кислоты -CO ₂ H
1179,9	Ср.	Др.	Ароматические альдегиды
1116,8	-//-	-//-	-//-
1067,8	С.	Вал.С-О	Ациклические ангидриды
1026,7	Сл.	Плоскостные деф.к. С-Н для разл. типов замещения бензольного кольца	Дизамещенные
959,5	Сл.	Вал. и деф. Колебания С-Н	СНО
914,1	-//-	-//-	-//-
872,3	-//-	-//-	-//-
788,5	-//-	-//-	-//-

735,6	С.	Внеплоскостн. деф. С-Н для замещ. Бензольного кольца	Монозамещенные
678,2	С.	Внеплоскостн. деф. С-Н для замещ. Бензольного кольца	Тризамещенные
621,0	С.	Др.	Вторичные амиды
578,8	-//-	-//-	-//-

В исходном состоянии ИК-спектр водонефтяных эмульсий представлен (рисунок 4, таблица 4) высоковязкими углеводородами с двойной углеродной связью (1685, 1653, 1589 см^{-1}), включающие органические кислоты (2960, 1967) и альдегиды различного строения (1427, 1377, 1342, 1179, 1116 и др.). В высокочастотной области спектра (3452, 3048) видны отклики минеральных солей преимущественно хлористоводородных и аминокислотных соединений. Они же дают рефлекс в низкочастотной области спектра (678, 578). Таким образом, по ИК-спектральному составу исходные нефтепродукты принадлежат к классу нафтоароматических углеводородов.

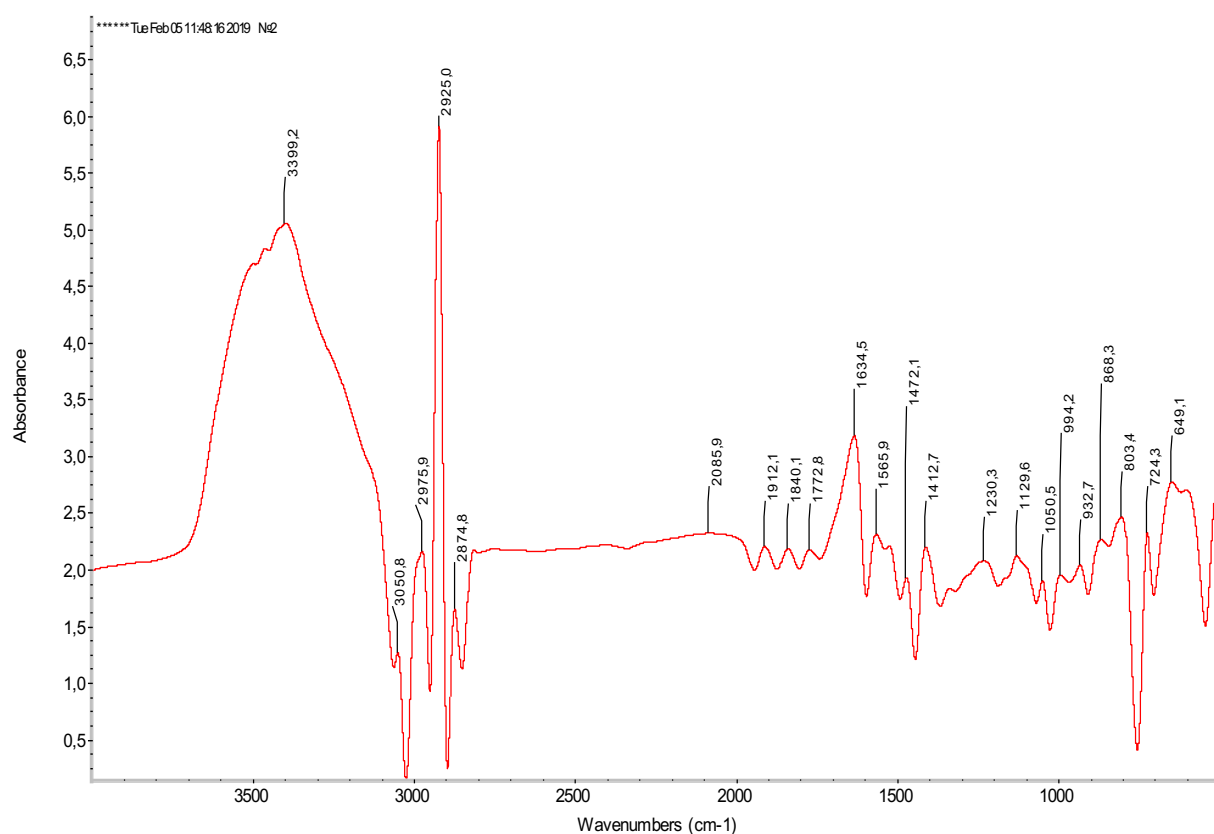


Рисунок 5 – ИК-спектры после обработки в поле преобразователя с Cu – Fe электродами

Таблица 5 – ИК-спектры после обработки в поле преобразователя с Cu – Fe электродами

Частота, см ⁻¹	Интенсивность	Тип колебаний	Вид соединения
1	2	3	4
3399,2	Пер.	Вал. N-H	Первичные амины
3050,8	Ср.	Вал. NH ₃ ⁺	аминокислоты NH ₂
2975,9	Ср.	Вал. C-H	-CH ₃
2925,0	Ср.	Вал. C-H	-CH ₂
2874,8	Ср.	Вал. C-H	-CH ₃
2085,9	Сл., ср.	Вал. NH ⁺	Все NH ⁺
1912,1	-//-	-//-	-//-
1840,1	-//-	-//-	-//-
1772	С.	Вал. C=O	Ангидриды с 5-чл.ц.
1634	Сл.	Деф. N-H	Вторичные амины
1565	С.	Вал. C=O	-CO-C=C-OH (NH ₂)
1472	С.	NH ₄ ⁺	Соединения бора NH ₄ ⁺
1412	С., пер.	B- CH ₃	Соединения бора CH ₃
1230	С.	P-O	Фосфорорг. соединения
1129	Сл.	Плоскостные деф.к. C-H для разл.типов замещ. бензольного кольца	Дизамещенные
1050	-//-	-//-	-//-
994	Сл.	Плоскостные деф.к. C-H для разл.типов замещения бензольного кольца	Тризамещенные
932	С.	Вал. C-O	Простые эфиры. Эпоксиды (транс)
868	Ср.	Плоскостные деф.к. C-H для разл.типов замещения бензольного кольца	Дизамещенные
803	С.	внеплоскостные деф.к. C-H для разл.типов замещения бензольного кольца	Дизамещенные
724	Ср.	-//-	-//-
649	Сл.	Вал. C-S	Сераорганические

На рисунке 5 и в таблице 5 приведены результаты обработки этой водонефтяной эмульсии с применением металлических электродов (медь, железо). В течении первых суток эксперимента наблюдали процесс стратификации (расслоение) во всем объеме реактора, сопровождающийся уменьшением толщины поверхностного слоя водонефтяной эмульсии. ИК-спектры выявили изменение химического состава воды после воздействия, в которой присутствует большое количество бензольных производных с разной структурой, карбонатные кислоты и другие водорастворимые соединения. В высокочастотной области спектра выявлены частоты (3399, 3050, 2085), характерные для первичных аминов и аминокислот. Кроме того, в низкочастотной зоне спектра появились водорастворимые сераорганические соединения (649 см^{-1}). Здесь хорошо видно, что химический состав существенно изменился в сторону появления водорастворимых соединений.

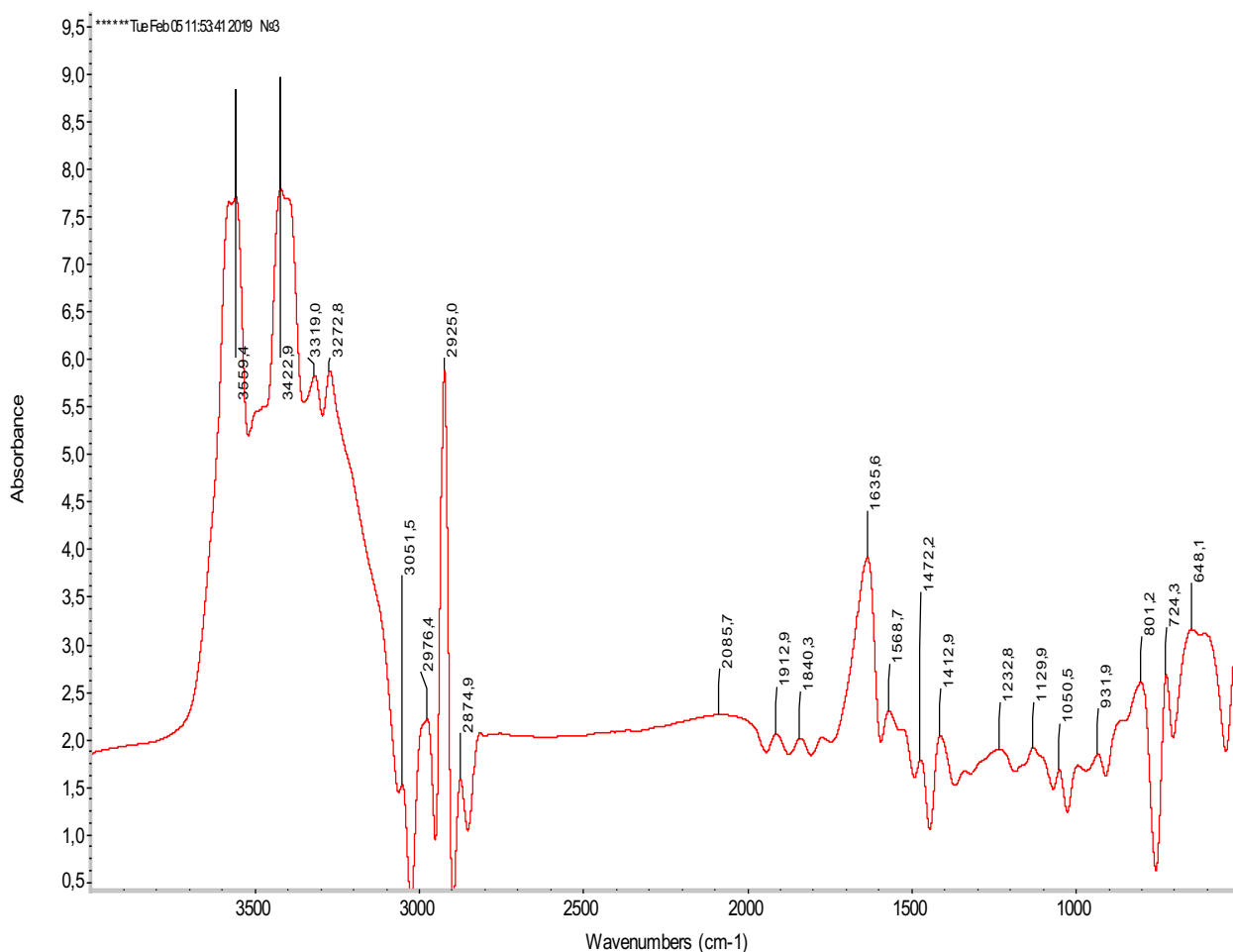
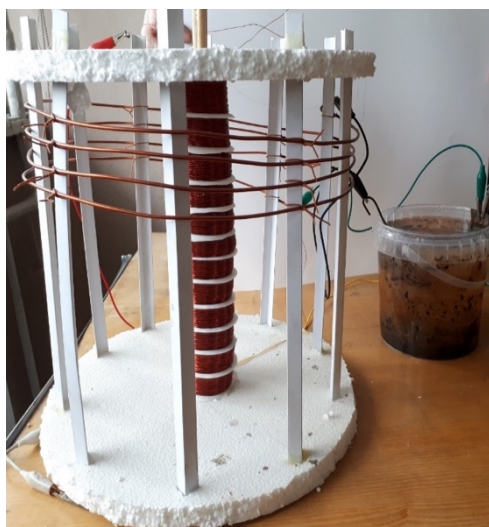


Рисунок 6 – ИК-спектры после обработки водонефтяной эмульсии в поле преобразователя с С-С электродами

Таблица 6 – ИК-спектры водонефтяной эмульсии после обработки с измененной схемой преобразования

Частота, см ⁻¹	Интенсивность	Тип колебаний	Вид соединения
1	2	3	4
3559,4	Пер.	Вал. О-Н	Спирты и фенолы. Внутрималекулярн.связь.
3422,9	-//-	-//-	-//-
3319	С.	Вал. О-Н	Спирты и фенолы. Полизссоциаты
3272	-//-	-//-	-//-
3051	Сл.	Вал. О-Н	Спирты и фенолы. Хелатные соединения
2976	-//-	-//-	-//-
2925	-//-	-//-	-//-
2874,9	-//-	-//-	-//-
2085,7	-//-	-//-	-//-
1912,9	-//-	-//-	-//-
1840,3	-//-	-//-	-//-
1635,6	С.	Вал. С=О	Кетоны. Хиноны: две группы СО в разных циклах
1568,7	С.	Вал. С=О	-СО-CH ₂ -СО- (енольная форма)
1472,2	С.	NH ₄ ⁺	Соединения бора. Неорг. ионы и молекулы NH ₄ ⁺
1412,9	С.	Вал. S=O	Ковалентные сульфаты
1232,8	Оч.с.	Вал. С-Х	Галоидные производные орг.соединения. Дифторзамещенные
1129,9	-//-	-//-	-//-
1050,5	-//-	-//-	-//-
931	Сл.	Вал.и деф.С-Н	Альдегиды. СНО
801,2	-//-	-//-	-//-
724,3	Ср.	внеплоскостные деф.к. С-Н для разл.типов замещения бензольного кольца	Дизамещенные
648,7	Ср.	Др.	Вторичные амиды



а)



б)

Рисунок 7 – Общий вид устройства нестандартного преобразователя по принципу Тесла (а – с Cu-Fe электродами, б – с графитовыми электродами)

Изменение схемы воздействия (рисунок 6, таблица 6) привело к появлению большого количества спиртов и фенолов (3559, 3422, 3319, 3272, 3051). Хелатные соединения представлены откликами на частотах 2976, 2925, 2874, 2885, 1912. Соединения серы выявляются в виде ковалентных сульфанатов (1472), остальные производные минеральных солей (1232) дают водорастворимые соединения, равномерно распределенные в объеме экспериментального реактора. Следов стратификации не обнаружено. Таким образом, изменение схемы воздействия, показанное на рисунке 7, (3 катушки и графитовые электроды) привело к появлению принципиально новых соединений, обладающих свойствами растворителей.

6.2 Ультразвуковая обработка.

Для того, чтобы получить оптимальное решение вопроса по увеличению текучести нефти и снижению вязкости был проведен эксперимент в лабораторных условиях на частоте 42,8 кГц. Величина частоты при которой вода разлагается, тем самым создавая условие для ультразвукового воздействия, которая была выведена Кили. Он нашел, что резонансная частота «звука» для распада воды равна 42712,2 Герц. Кстати, американский изобретатель Генри Пухарич, нашел резонансные частоты распада воды, и одна из них равна примерно 42800 Гц, то есть такая же, как и частота Кили.

В процессе данного эксперимента нефть, характеристика которой приведена в Табл. 7, подвергалась воздействию ультразвукового излучателя,

оснащенного магнитострикционным преобразователем. Потребляемая мощность ультразвукового генератора составляет 4000 Вт, максимальная акустическая мощность (выходная мощность) - 2000 Вт. В работе исследования проводились при мощности, равной 50% от максимальной, то есть 1000 Вт. Принципиальная схема ультразвуковой установки приведена на рисунке 8.

Таблица 7 – Основные показатели

Параметр	Значение
Плотность нефти при 20°C	853 кг/м ³
Кинематическая вязкость	1,348 * 10 ⁻⁵ м ² /с
Содержание воды	0,06%

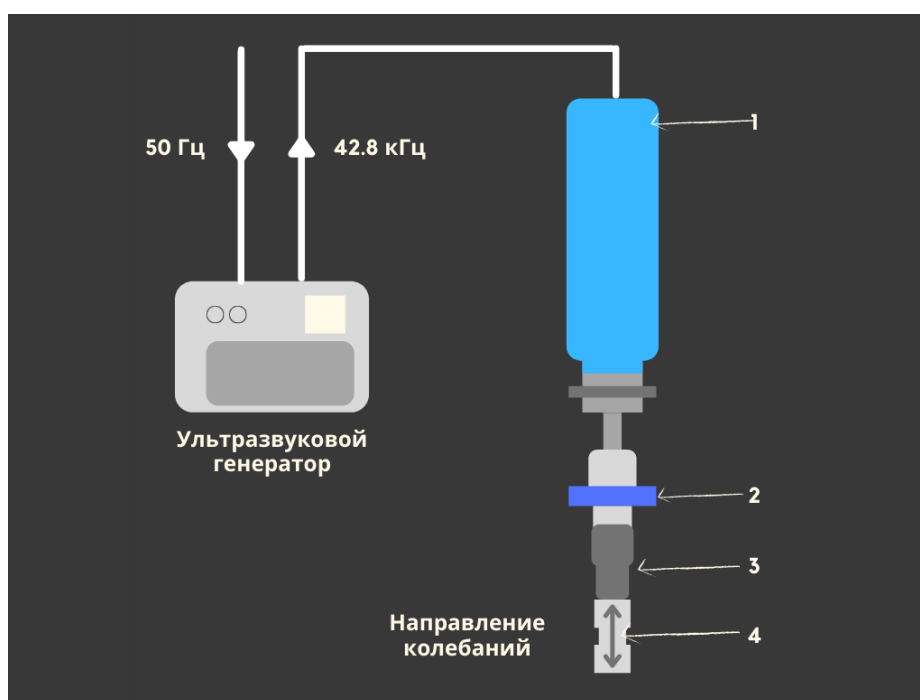


Рисунок 8. Принципиальная схема ультразвуковой установки: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – усилитель; 3 – излучатель; 4 – указатель направления колебаний.

Напряжение ультразвуковой частоты подается от ультразвукового генератора на ультразвуковой преобразователь 1, в котором напряжение преобразуется в механические колебания ультразвуковой частоты. Эти колебания проходят через усилитель 2 к излучателю 3, с помощью которого они вводятся в обрабатываемую среду.

Процесс нагрева нефти и снижения его вязкости в результате ультразвуковой обработки обусловлен тем, что при ультразвуковой обработке нефти происходят кавитационные процессы, заключающиеся в локальной концентрации энергии акустического поля относительно небольшой величины в виде кавитационных пузырьков, схлопывание которых приводит

к возникновению высоких плотностей энергии. [5] Далее в процессе кавитации происходит разрыв длинных и разветвленных молекул углеводородов, сопровождающийся выделением тепла, то есть – экзотермией.

Технические характеристики ультразвукового генератора, использованного в эксперименте, приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Минимальная тех. характеристика ультразвукового генератора

Параметр	Значение
Максимальная выходная мощность	2000 Вт
Частота	42,8 кГц

Данное исследование представляет собой доказательство эффективности влияния ультразвуковой обработки на вязкость нефти. В ходе экспериментов происходил нагрев нефти. Образец подвергался воздействию ультразвука с частотой 42,8 кГц, акустической мощностью 1000 Вт в течение 30 секунд, 45 секунд и 1 минуты.



Рисунок 9 - Установка для ультразвуковой обработки нефти.

В ходе эксперимента образец нефти определенного объема помещали в резервуар, затем в этот резервуар опускали волновод ультразвукового излучателя, после чего проводили процесс ультразвуковой обработки нефти, как представлено на рисунке 9. После обработки измеряли температуру нефти и заливали его в чашку вискозиметра для измерения вязкости. Затем эксперимент повторили с новым объемом пробы нефти, а также с новой длительностью ультразвуковой обработки.

Результаты эксперимента по изменению вязкости нефти под

воздействием ультразвука на нефть с температурой 20°C в течение 30 секунд, 45 секунд и 1 минуты, приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты эксперимента

Параметр	Показатели после 30 с	Показатели после 45 с	Показатели после 60 с
Температура	25°C	30°C	32°C
Кинематическая вязкость, $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	1,147	1,078	1,008

На основе полученных данных построены графики, показывающие изменение вязкости нефти. Эти графики показаны на рисунке 10.

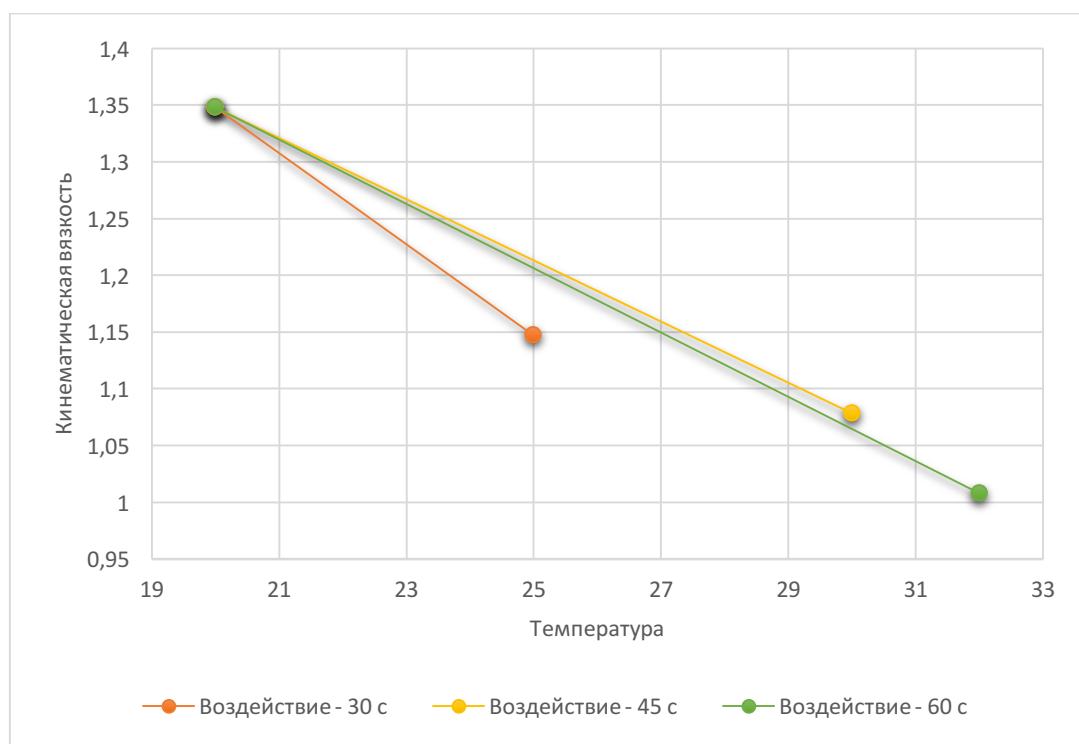


Рисунок 10 – Результаты эксперимента в графическом виде

- при ультразвуковом воздействии на нефть в течение 30 секунд – эффект снижения вязкости составляет 14,91%;
- при ультразвуковом воздействии в течение 45 секунд – снижение составляет 20,03%;
- при ультразвуковом воздействии в течение 1 минуты – вязкость снижается на 25,22%;

Таким образом, ультразвуковое воздействие на нефть действительно оказывает хороший эффект снижения вязкости. Данное свойство может быть использовано в процессах транспортировки вязких нефтей в нефтепроводах при условии, что ультразвуковое оборудование экономически целесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время повышение нефтеотдачи с помощью ультразвука вновь стало предметом интереса из-за его высокого вклада в увеличение добычи, низкой стоимости, низкого энергопотребления, высокой адаптивности, зональной селективности и нулевого загрязнения.

Таким образом, совокупность полученных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Спектральный состав водонефтяной эмульсии месторождения Узень существенно изменяется при обработке его в водной среде с применением индукционных преобразователей Тесла

2. Полученные экспериментальные результаты позволяют прогнозировать изменение химических структур от простейших углеводов до ароматически сложного строения.

3. Управление заданными свойствами можно осуществлять, изменяя материалы электродов воздействия и схему подключения преобразователей, работающих в автономном режиме.

4. По результатам лабораторного эксперимента установлено, что после ультразвукового воздействия происходит нагрев нефти, вследствие чего наблюдается снижение вязкости до 25 %.

Для эффективного применения данного метода снижения вязкости нефти необходимо тщательно подбирать оптимальный режим волновой обработки. При усовершенствовании существующих технологий данный метод в комплексе с другими можно использовать для разработки трудно извлекаемых запасов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Прачкин В.Г, Интенсификация добычи нефти комбинированным методом на основе ультразвукового воздействия: дисс. ...канд. техн. наук: 25.00.17 / ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – Уфа, 2018. – 148 с.
- 2 Муллакаев М.С., Ультразвуковые технологии восстановления продуктивности низкодебитных скважин / Муллакаев М.С., Салтыков Ю.А., Салтыков А.А., Муллакаев Р.М. // Neftegaz.RU. – 2020. – №2
- 3 R. G. Santos, An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods / R.G. Santos, W. Loh, A.C. Bannwart, O.V. Trevisan // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – Brazil, 2014. – 31 (03). – p.571 – 590.
- 4 A. Agi, et al., Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding, Journal of King Saud University // Engineering Sciences. – 2019. – 31 (3). – p.296–303.
- 5 A.Agi, Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery / A.Agi, R.Junin, A.S.Chong // J. Petrol. Sci. Eng. – 2018. – 166. – p.577–591.
- 6 A. Ghamartale, et al., Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure // Ultrasonic. Sonochemistry. – 2019. – 51. – p.305–314.
- 7 R. Rezaei Dehshibi, et al., Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model // Fuel. – 2019. – 239. – p.709–716.
- 8 S. He, et al., Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge // Environ. Technol. – 2019. – 40 (11). – p.1401–1407.
- 9 E. Mohammadian, The Effects of Properties of Waves on the Recovery of Ultrasonic Stimulated Water flooding / E. Mohammadian, M. Parak, P. Babakhani // Petrol Science Technologies. – 2014. – 32(8). – p.1000–1008.
- 10 Z.Wang, Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-chemical agent for enhanced oil recovery / Z.Wang, J.Huang // Ultrason. Sonochem. – 2018. – 42. – p.754–758.
- 11 N. Khan, et al., Comparison of Acidizing and Ultrasonic Waves, and Their Synergetic Effect for the Mitigation of Inorganic Plugs, Energy Fuels. – 2017. – 31 (10). – p.11134–11145.
- 12 Z. Wang, Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery / Z. Wang, Y. Xu, Y. Gu // Ultrason. Sonochem. 27 (2015) 171–177.
- 13 M.S. Mullakaev, Effect of ultrasound on the viscosity- temperature properties of crude oils of various compositions / M.S. Mullakaev, G.I. Volkova, O.M. Gradov // Theor. Found. Chem. Eng. . – 2015. – 49(3). – p.287–296.
- 14 F. Aliev, The influences of ultrasound waves on rheological and physico-chemical properties of extra heavy oil from “ASHALCHA” field / F. Aliev, I. Mukhamatdinov, A. Kemalov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM 17. – 2017. – 1(4). – p.941–948.
- 15 M. A. Rahimi et al, Effect of ultrasonic irradiation treatment on

rheological behaviour of extra heavy crude oil: A solution method for transportation improvement, *Can. J. Chem. Eng.*, . – 2017. – 95 (1). – p.83-91.

16 K. Naderi, Visual analysis of immiscible displacement processes in porous media under ultrasound effect / K. Naderi, T. Babadagli // *Phys Rev E*. – 2017. – 83 (5).

17 K. Naderi, Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types / K. Naderi, T. Babadagli // *Ultrason. Sonochem.* – 2010. – 17 (3). – p.500–508.

18 S.M. Mousavi, et al., Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils, *Pet. Sci.* – 2012. – 9(1).

19 E. Mohammadian, et al., Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding, *Ultrasonics*. – 2013. – 53 (2). – p.607–614.

20 H. Hamidi, et al., A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium, *Ultrasonics*. – 2014. – 54(2). – p.655–662.

21 A.G. Palaev, Research of the impact of ultrasonic and thermal effects on oil to reduce its viscosity / A.G. Palaev, I.A. Shammazov, E.R. Dzhemilev // *Journal of Physics: Conference Series*.

22 Ершов М.А., Муллакаев М.С., Баранов Д.А. Снижение вязкости нефти с применением ультразвуковой обработки и химических реагентов // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2011. – № 4. – С. 22 - 26.

23 В.Г. Прачкин, Повышение продуктивности скважин методом акустического воздействия на высоковязкие нефти в каналах призабойной зоны скважины / В.Г. Прачкин, М.С. Муллакаев, Д.Ф. Асылбаев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2014. – №9. – с. 15-19

24 D.-R. Olaya-Escobar, “Ultrasound Applied in the Reduction of Viscosity of Heavy Crude Oil” / D.-R. Olaya-Escobar, L.-A. Quintana-Jiménez, E.-E. González-Jiménez; Erika-Sofía Olaya-Escobar // *Revista Facultad de Ingeniería*, . – 2020. – 29 (54).

25 H. Hamidi, Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results / H. Hamidi, A.S. Haddad, E.W. Otumudia, R. Rafati, E. Mohammadian // *Ultrasonics*. – 2020. – Vol. 110.

26 Б.Н.Тарасевич, Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК спектроскопии. // МГУ имени М.В. Ломоносова, Хим. фак, каф. орг. химии. – Москва, 2012. – С. 22

27 T.P. Klokova, The influence of ultrasound on the colloidal- disperse properties of oil systems / T.P. Klokova, Y.A. Volodin, O.F. Glagoleva // *Chemistry and technology of fuels and oils*. – 2006. – 42. – p. 42-46

28 V.G. Prachkin, Improving the productivity of wells by means of acoustic impact on high-viscosity oil in the channels of the face zone of a well / V.G. Prachkin, M.S. Mullakayev, D.F. Assylbayev // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2015. – Vol. 50. – p. 571-578