

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**WAVEWELLTECH: ИННОВАЦИОННАЯ ВОЛНОВАЯ  
ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ  
НЕФТИ**



**КАЗАНЬ**

**2024**

УДК 622.276.6  
ББК 33.361  
W35

*Печатается по рекомендации учебно-методической комиссии  
Института геологии и нефтегазовых технологий  
Казанского (Приволжского) федерального университета  
(протокол № 9 от 25 апреля 2024 г.),  
кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов  
(протокол № 12 от 28 февраля 2024 г.)*

**Авторы:**

**А.Г.Х. Алфаяд, Р.А. Кемалов, А.Ф. Кемалов, Д.З. Валиев**

**Рецензенты:**

доктор технических наук, доцент, начальник отдела организации работ по  
ПНП ПАО «Татнефть» **И.Г. Фаттахов;**  
кандидат химических наук, доцент КФУ **Д.А. Ибрагимова**

**WaveWellTech: инновационная волновая технология для  
W35 интенсификации добычи нефти [Электронный ресурс] / А.Г.Х. Алфаяд,  
Р.А. Кемалов, А.Ф. Кемалов, Д.З. Валиев. – Электронные текстовые данные  
(1 файл: 38,2 Мб). – Казань: Издательство Казанского университета, 2024. –  
122 с. – Системные требования: Adobe Acrobat Reader. – URL:  
[https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1758391423/1\\_knig\\_uz\\_1\\_1.pdf](https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1758391423/1_knig_uz_1_1.pdf) – Загл.  
с титул. экрана.**

**ISBN 978-5-00130-814-0**

В монографии представлены результаты научных исследований автора А.Г.Х. Алфаяда, проведенных в рамках подготовки кандидатской диссертации. Работа фокусируется на интенсификации добычи нефти с использованием волновой технологии на пласте, представляющей собой инновационный метод, особенно эффективный для эксплуатации месторождений на поздних стадиях разработки, где присутствует высокая концентрация асфальтенов, смол и парафинов. Результаты исследований подтверждают высокую эффективность предложенной технологии, показывая возможность удвоения межремонтного периода.

Эта книга будет полезна научным и инженерно-техническим работникам, специалистам нефтегазового сектора, а также аспирантам и студентам, изучающим направление «Нефтегазовое дело».

УДК 622.276.6  
ББК 33.361

**ISBN 978-5-00130-814-0**

© Издательство Казанского университета, 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР .....	7
1.1 Методы воздействия на призабойную зону пласта для интенсификации добычи .....	7
1.1.1 Волновые методы воздействие на пласт .....	12
1.2 Общие сведения об ультразвуковой технике .....	18
1.3 Общие сведения о воздействии ультразвука на жидкость пласта .....	20
1.3.1 Ультразвуковое снижение вязкости нефти .....	20
1.3.2 Ультразвуковое удаление отложений .....	21
1.3.3 Ультразвуковая деэмульсация и обезвоживание .....	21
1.3.4 Ультразвуковая очистка от накипи .....	21
1.4 Ультразвуковое улучшение проницаемости пористой среды .....	22
1.5 Анализ волнового воздействия на изменение реологической характеристики тяжелой нефти .....	32
1.5.1 Изменение реологических характеристик пластовой жидкости в акустическом поле .....	35
1.6 Принцип действия и описание аппаратуры акустического воздействия .....	38
1.7 Устройства генерации упругих волн .....	40
1.8 Основные способы осуществления волнового воздействия на пласт .....	47
Литература к главе 1 .....	50
2 ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК МЕТОД РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЕ .....	54
2.1 Введение .....	54
2.2. Акустические характеристики кавитации .....	56
2.2.1 Акустическая кавитация и кавитационный порог .....	56
2.2.2 Динамика пузыря .....	56
2.2.3. Механические эффекты акустической кавитации: ударные волны и микроструи .....	58
2.2.4 Эффекты сонохимии: свободные радикалы кислорода .....	60
2.3 Влияние акустических параметров и свойств среды на акустическую кавитацию .....	60
2.4 Влияние ультразвука на повышение нефтеотдачи .....	61
2.5 Влияние ультразвука на повреждение пласта в пористой среде .....	68

ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2.....	73
Литература к главе 2 .....	74
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ ПОР- ЖИДКОСТЬ-ГАЗ ПЛАСТА.....	80
3.1 Краткие физические основы применения ультразвуковых и звуковых колебаний.....	80
3.2 Методология расчётов влияния волнового воздействия по системе жидкость-газ пласта .....	81
3.2.1 Методология.....	82
3.3 Численное моделирование .....	85
3.4 Численный эксперимент.....	88
3.4 Результаты и обсуждения.....	90
3.4.1 Вертикальное смещение.....	90
3.5 Расчёты акустического воздействия на призабойную зону скважины ..	96
3.6 Методика расчета оценки вязкости.....	106
4.7 Программное моделирование .....	107
4.8 Методика расчет приток жидкости и газа к скважинам .....	108
3.9 Методика оценки производительности скважины .....	109
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
Литература к главе 3 .....	116

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Использование новых технологий очень важно при добыче и разработке месторождений тяжёлой нефти. В связи с ростом добычи тяжёлых нефти проблема устойчивости нефти к выпадению тяжёлых фракций, состоящих, главным образом, из смол, асфальтенов и парафинов, становится все более актуальной требует дальнейшего совершенствования методов ее решения.

В процессе эксплуатации скважины проницаемость пород, оказывается ухудшенной по сравнению с первоначальной, естественной. Таким образом, возрастает сопротивление фильтрации жидкости и газа, снижается дебит скважины из-за отложений в породах призабойной зоны скважины асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО), поэтому необходимо искусственное воздействие на призабойную зону пласта.

Большинство нефтяных и газовых месторождений находятся на завершающей стадии разработки, характеризующейся падением дебита скважины и ухудшением условий добычи флюида. В результате на многих месторождениях подавляющее большинство скважин переведено на механизированную или периодическую эксплуатацию. Добыча нефти и газа на таких месторождениях становится неэффективной или малоэффективной. Неоднородность коллекторских свойств пласта приводит к неравномерному нефтегазоотделению и снижению коэффициента нефтеотдачи. При длительной работе добывающих скважин на выбранном режиме эксплуатации происходит кольматация прискважины продуктивного пласта, снижаются фильтрационно-емкостные характеристики. Основными препятствиями в добыче нефти и газа на поздней стадии разработки и эксплуатации скважин являются увеличение обводненности углеводородов (до 80-90%), парафинизация, заилирование и закупоривание тяжелыми фракциями нефти и песком нефтеносного продуктивного пласта в призабойной зоне. Такое загрязнение связано с интенсивным выделением растворенного газа, отложением неорганических солей, наличием глинистых частиц, резко снижающих гидродинамическую связь скважины и пласта. Поэтому на поздних стадиях разработки месторождений мы имеем дело с другими коллекторскими свойствами, новыми гидродинамическими, гидрогеологическими, тепловыми и физико-химическими режимами пласта. В этих условиях актуальна задача повышения эффективности действующих месторождений за счет использования потенциальных возможностей каждой скважины. К тому же, решение этой проблемы возможно без значительных материальных затрат [1-3].

Учитывая изложенное, работа в сфере создания новых комбинированных физико-химических методов повышения эффективности добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов приобретает важное народнохозяйственное значение. Экологически безопасное ультразвуковое (УЗ) воздействие представляется при этом весьма актуальным для решения практически всего комплекса этих проблем [2, 3].

Механизм протекающих в пласте процессов по-прежнему неясен, что обусловлено сложностью и разнообразием объектов воздействия: пласт может быть насыщен водой, газом, легкой, масляной или тяжелой нефтью; снижение дебита связано с парафинизацией ПЗП, ее заилением, отложением мелких глинистых частиц, содержащихся в фильтрате промывочной жидкости, с засорением перфорационных отверстий и т.д. Как правило, воздействие имеет комплексный характер, хотя тот или иной эффект играет преобладающую роль [2].

Мощный ультразвук, как развивающаяся зеленая технология, привлекает все большее внимание нефтяной промышленности. Физические и химические эффекты периодических колебаний и взрыва акустических кавитационных пузырьков могут использоваться для выполнения множества функций. Здесь представлены механизмы и эффекты акустической кавитации. Кроме того, подробно обсуждаются применения мощного ультразвука в нефтяной промышленности, включая повышение нефтеотдачи, извлечение нефтеносного песка, деэмульгацию, снижение вязкости, очистку нефтесодержащих сточных вод и нефтешламов. С точки зрения промышленного фона обсуждаются ключевая проблема и механизм решения, текущие приложения и будущее развитие мощного ультразвука.

Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических, а также со стандартными и разработанными методиками проведения экспериментальных исследований по предотвращению АСПО. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики (Mathcad, Statistics, MAPP XT Meyer Sound, Microsoft Word, MathType).

Предлагаемое волновое воздействие создает возможность для эксплуатации месторождений на более поздних стадиях разработки, которые характеризуются высоким содержанием асфальтенов, смол и парафинов. Результаты волнового воздействия подтвердили эффективность этой технологии, которая позволила вдвое увеличить межремонтный период.

## 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

В нефтяной промышленности высокая вязкость тяжелой нефти остается серьезной проблемой в области повышения нефтеотдачи. Для увеличения добычи нефти используются различные типы традиционных методов повышения нефтеотдачи (МУН). Это включает закачку  $\text{CO}_2$ , пара, химикатов и заводнение. Каждый из этих методов помогает увеличить статическое давление в нефтяном резервуаре, выталкивая остаточную нефть из захваченных областей [1]. Чтобы повысить эффективность этих методов, многие связанные с ними исследовательские усилия продолжают проводиться, в основном, в области моделирования и программного моделирования с использованием некоторых коммерчески доступных пакетов программного обеспечения [1]. Совместные и настойчивые исследовательские усилия позволили этим пакетам программного обеспечения стать достаточно зрелыми, включив в них большинство характеристик нефтяных пластов (например, проницаемость, пористость и вязкость нефти). Несмотря на некоторые обнадеживающие результаты, полученные на нефтяных месторождениях, эти методы имеют недостатки, заключающиеся в том, что они не являются экологически безопасными, а также требуют дорогостоящих резервуаров для хранения и транспортной инфраструктуры [1]. Кроме того, в долгосрочной перспективе эти методы могут серьезно повредить пласт (например, коррозия подземных устройств и снижение проницаемости пласта [1]).

### **1.1 Методы воздействия на призабойную зону пласта для интенсификации добычи**

Третичные методы в процессе добычи нефти, называемые «методами повышения нефтеотдачи» (МУН), в основном применяются на зрелых нефтяных месторождениях с тенденцией к снижению добычи после первичных и вторичных методов нефтеотдачи или сразу после фазы первичной добычи. Эти методы «повышенной нефтеотдачи» предполагают закачку газов или жидкостей для мобилизации остаточной нефти, захваченной в породоколлекторе из-за наличия сильных вязких и капиллярных сил и высокого значения межфазного натяжения между жидкостью и породой. В зависимости от типа закачиваемого флюида, механизма добычи, а также подхода к реализации методы увеличения нефтеотдачи подразделяются на тепловые, химические, смешивающиеся несмешивающиеся с закачкой газа и другие методы, которые пока имеют экспериментальное применение. Процесс добычи

нефти из пласта включает три этапа: первичную, вторичную и третичную добычу [2].

На этапе первичной добычи нефть добывается за счет естественной энергии пласта (уплотнение, растворенный газ, водяной режим, режим газовой шапки, гравитационный режим) с КИН 10-30%. Вторичными методами добычи являются закачка воды или газа для поддержания пластового давления и увеличения добычи. Дополнительный коэффициент извлечения за счет применения этих методов составляет 10-20%. Средний коэффициент нефтеотдачи текущих разрабатываемых нефтяных пластов в мире составляет около 35-40%. Третичные методы, называемые «методами повышения нефтеотдачи» (МУН), в основном применяются на зрелых нефтяных месторождениях с тенденцией снижения добычи после первичных и вторичных методами или сразу после фазы первичного производства [3-7]. Эти методы «повышенной нефтеотдачи» (EOR) предполагают закачку газов или жидкостей для мобилизации остаточной нефти, захваченной в породе-коллекторе из-за наличия сильных вязких и капиллярных сил и высокого значения межфазного натяжения между жидкостью и породой. Прирост извлечения этими методами может составить 15-25%. Фазы нефтеотдачи нефтяного пласта с соответствующими коэффициентами нефтеотдачи представлены на рисунке 1.1.

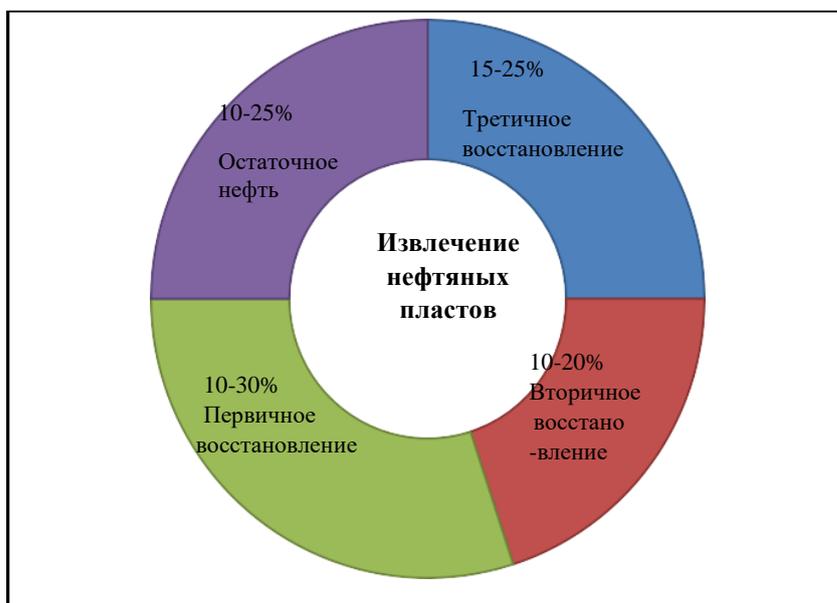


Рисунок 1.1 – Коэффициент извлечения нефтяного пласта

Таким образом, на остаточную нефть приходится 10-25%, на третичное восстановление 15-25%, на первичное восстановление 10-30%, на вторичное

восстановление 10-20%.

В таблицах 1.1, 1.2 представлен сравнительный анализ применения различных способов интенсификации притока из скважины, отражены как сильные стороны технологии, так и ограничения в ее применении. В этой группе методов, наиболее развитых сегодня в теоретическом и аппаратно-технологическом аспектах, особенно при воздействии на пласт и ПЗП из скважин, являются методы акустического воздействия, среди них – акустические в УЗ диапазоне [2, 3].

Рассмотрим основные явления, возникающие в процессе акустического воздействия.

Одним из эффектов, который наблюдался экспериментально в акустическом поле интенсивностью 8-100 кВт/м<sup>2</sup>, является изменение вязкости свободной нефти [1].

Снижение вязкости достигает 20-30% и объясняется разрушением циклических структур за счет интенсивных колебательных процессов, а также нагревом нефти и содержащихся в ней парафинов, вызванным диссипацией акустической энергии [2].

Кроме того, при распространении акустических волн в насыщенной пористой среде увеличивается ее эффективная теплопроводность. Так, нагрев в акустическом поле интенсивностью более 1 кВт/м<sup>2</sup> и частотой 20-1500 кГц приводит к превышению температуры вдали от нагревателя по сравнению с обычным нагревом на 7-10°C., причем темп и радиус нагрева при этом возрастают [9].

Сравнительная характеристика эффективности предлагаемых методов  
увеличения нефтеотдачи [3]

Технология	Технологические показатели				Стоимость скважино-операции, тыс. руб.	Экономическая эффективность, руб/т. нефти
	Успешность обработок, %	Среднее приращение дебита, т/сут	Средняя продолжительность эффекта, мес.	Дополнительно добытая нефть, т		
Акустический комплекс с геофизическим прибором	95	8,0	12,0	2081	380	183
Акустическая обработка	80	5,0	10,0	915	330	361
Реагентно-гидроимпульсно-виброструйная обработка	90	8,4	9,0	1701	600	392
Комплексная кислотная обработка	89	5,4	6,0	729	500	771
Электрогидравлическая обработка	87,5	5,1	7,2	551	425	881
Азотно-импульсная обработка скважин	90	5,1	6,1	467	450	1071
Гидравлический разрыв пласта	70	12,5	12,5	3750	3500	1330
Виброволновое воздействие	75	4,5	10,0	1012	1500	1976
Объёмное волновое воздействие	75,7	1,8	12,0	518	1800	4590

Таблица 1.2

Сравнительный анализ применения различных способов интенсификации притока из скважины [3]

Способ интенсификации	Принцип интенсификации притока из скважины	Сильные стороны технологии	Ограничения в применении технологии
УЗ обработка (УЗО)	1. Разрушение устойчивых связей на границе пор и флюида, препятствующих движению жидкости под воздействием колебательной энергии, создаваемой в упругом поле ультразвуком. 2. Изменение реологии флюида, приближение к свойствам ньютоновской жидкости.	1. Полный охват мощности пласта УЗ колебаниями, включая пропластки с низкими фильтрационными свойствами. 2. Отсутствие риска повреждения целостности цементного камня и возникновения заколонной циркуляции. 3. Возможность интенсифицировать скважины с отсутствующим или низким притоком. 4. Нет ограничений по кратности применения и невысокая стоимость операции.	1. Теория УЗ воздействия не имеет широкого изучения в нефтяной промышленности. 2. Отрицательные результаты испытаний в 90-х гг. 3. На начальном этапе требуется расширенное применение геофизических исследований и освоения скважин, что ведет к удорожанию проекта.
Простелочновзрывные работы (реперфорация) (ПВР)	1. Создание дополнительных каналов в эксплуатационной колонне и призабойной зоне скважины.	1.Технология отработана и применяется в массовом количестве. 2. Высокая эффективность для высокопроницаемых коллекторов с монолитным строением. 3. Низкая стоимость операции.	1. Кратность применения (не более 2-3 раз на одном участке) из-за риска снижения несущей способности колонны и разрушения цементного камня. 2. Применяется в наборе с дополнительной интенсификацией (химическая обработка).
Соляно-кислотная + глинокислотная обработка (ОПЗ)	1. Очистка фильтрационных каналов призабойной зоны пласта от частичек глины и солевых отложений.	1. Глинокислотный состав очищает ПЗП от глинистых частичек и солевых отложений в терригенных коллекторах Западной Сибири. 2. Массовое применение на действующем фонде скважин (при отказе насоса). 3. Низкая стоимость операции.	1. Низкая эффективность обработок скважин с АСПО в призабойной зоне. 2. Большие риски возникновения заколонной циркуляции из-за плохого качества цемента за колонной. 3. Возможное выпадение нерастворимых асфальтенов при нарушении технологии. 4. Кратность обработок (не более 3-4).
Обработка высокотехнологичными химическими композициями (ОПЗ)	1. Очистка фильтрационных каналов ПЗП от частичек глины и солевых отложений.	1. Данная технология позволяет исключить из обработки ПЗП кислотой высокообводненные участки и участки с высокой проницаемостью.	1. Высокая стоимость операции. Сложность соблюдения дизайна технологии обработки. 3. Высокая степень контроля за качеством материалов и кратность обработки.

Расчеты, выполненные для продольной волны, распространяющейся в насыщенной нефтью пористой среде с типичными для коллекторов значениями проницаемости, показывают, что при интенсивностях акустического поля, реализуемых в настоящее время, акустические потоки не могут оказать решающего влияния на продуктивность или приемистость коллекторов.

Акустическая кавитация жидкости, находящейся при давлении, превышающем давление насыщения, связана с наличием в ней газовых пузырьков-зародышей [9]. Пульсации стенок пузырьков могут привести к их росту в результате так называемой выпрямленной диффузии. Пузырьки, достигшие определенного максимального размера схлопываются, что приводит к возникновению ударных волн, способствующих перемешиванию жидкости и очистке пор, а в отдельных случаях - и к некоторому увеличению пористости за счет разрушения матрицы. Установлено, однако, что явление выпрямленной диффузии и, соответственно, кавитация, возникают при достижении акустическим давлением некоторой пороговой величины. Для свободных жидкостей, находящихся при давлении выше давления насыщения, этот порог достигает десятков и сотен атмосфер и в реальных условиях практически недостижим [2, 3].

Рост свободного газосодержания пластового флюида – его разгазирование, вызванное выпрямленной диффузией, может привести к резкому снижению фазовой проницаемости пласта по отношению к нефти, т.е. к ухудшению коллекторских свойств залежи.

Эффективное использование акустических и гидродинамических методов воздействия на пласты горных пород при разработке нефтяных месторождений предполагает знание процессов и явлений, протекающих в насыщенных пористых средах, в том числе при распространении упругих волн [2].

### **1.1.1 Волновые методы воздействия на пласт**

Виброволновое воздействие на породы продуктивного пласта. Создается при работе штангового насоса, который упирается в зумпф через специальный хвостовик и колонну труб. В результате проведения обработки в породе формируются волны упругих деформаций, распространяющиеся на большое расстояние от скважины и обеспечивающие получение значительных эффектов. Упругие волны формируют в пласте зону уплотнения, что улучшает его фильтрационные характеристики. Технология эффективно реализуется только при следующих условиях:

- остаточные запасы на месторождении должны составлять не менее 30-50%;
- обводненность продукции должна колебаться в пределах 60-80%;
- необходимо наличие хотя бы одной скважины, оборудованной штанговым насосом.

Недостатками данного метода является сложность выполнения технологических и технических параметров. Очень сложно выйти на режим резонанса частот, который должен быть кратной работе штангового насоса в системе «насос-колонна-порода зумпфа» [1, 3].

Плазменно-импульсное действие. Применение технологии плазменно-импульсного воздействия на продуктивный пласт предполагает использование электрических разрядов, которые создаются в жидкости и подаются через калибровочный металлический проводник. Под действием разряда образуется плазменный канал, при взаимодействии с проводником образует зону повышенного давления и температуры. Взаимодействие этих факторов приводит к образованию ударной волны, распространяющейся пластом с высокой скоростью. Образовавшаяся волна, выходя через перфорационные каналы, проникает в упругую среду, вызывая ее движение, поэтому быстро угасает и превращается в ряд последовательных колебаний. Многократное повторение плазменного импульса в определенных точках формирует широколинейный сигнал от 1 до 20 кГц. Плазменно-импульсное влияние на продуктивный пласт возбуждает колеблющуюся систему в широком диапазоне и создает достаточно сложную упруговолновую картину, которая недостаточно изучена. Высокочастотные колебания оказывают разноплановое влияние как на пласт, так и на элементы крепления скважины. Поэтому применение высоких частот не означает, что их результат будет более эффективным [8].

На сегодняшний день одним из перспективных направлений в решении проблемы повышения нефтегазоотдачи пластов является использование разного рода волновых процессов для интенсификации нефтегазоизвлечения и снижения обводненности добываемой продукции. Интерес к методам быстротечного волнового процесса возник из практических задач повышения нефтегазоизвлечения. В то же время экспериментальные исследования акустических, виброударных и волновых процессов воздействия на пласт имеют противоречивый характер: в некоторых случаях с их помощью удается достичь значительного увеличения притока флюида или повышения приемлемости нагнетательных скважин, в других случаях эффект совершенно отсутствует. Это

объясняется тем, что при применении разного рода волновых устройств и технологий четко не обнаружен механизм различных явлений, сопровождающих распространение волн в насыщенных средах. Для успешного применения волновых технологий в процессах добычи нефти и газа необходимо предварительно тщательно проанализировать все факторы и произвести расчет с целью установления параметров воздействия, обеспечивающих оптимальный эффект. Нами предложена техника и технология повышения процесса извлечения углеводородов, полностью отвечающая современным требованиям и включающая в себя комплексное влияние. Гидроакустическая обработка призабойной зоны пласта позволяет воздействовать на нефтегазовые пласты с помощью знаменных давлений разных частот и интенсивности. Мы предлагаем волновое устройство, генерирующее энергию от потока жидкости, проходящей через него. Эту энергию можно разделить на две составляющие: гидравлическую и акустическую.

Остановимся подробнее на акустическом действии. В процессе эксплуатации пласта в его скважинной части образуется зона с полем напряжений, влияющая на распределение воды, нефти и газа. Кроме того, за счет неоднородности коллекторских свойств, распределение нефти и воды в пласте также неоднородно. Таким образом, часть порового пространства насыщена и может иметь нефтяную пленку. Действие акустического поля ускоряет фазовые переходы, влияет на теплообмен и диффузию. Распределение акустического поля в жидкости с газом вызывает дегазацию. Это объясняется тем, что имеющийся в жидкости газ, а точнее пузырьки газа, под действием акустического излучения начинают двигаться к зоне пониженного давления. Это объясняется тем, что жидкость, в которой находятся пузырьки газа, начинает двигаться, тем самым приводя в движение стенки пузырьков. В зависимости от газонасыщенности и свойств жидкости, а также от интенсивности и частоты излучений пузырьки газа могут увеличиваться в объеме, щелкать или растворяться в жидкости. Особого внимания заслуживает также факт изменения вязкостных характеристик нефти под действием акустического излучения. Особенно актуален этот вопрос в регионах с высоковязкими нефтями (месторождения Прикарпатья и Карпат). Под действием акустических излучений интенсивностью 8-100 кВт/м<sup>2</sup> и частотой 20 Гц – 4,5 МГц происходит изменение вязкости нефти. Обычно после такого воздействия вязкость нефти сначала снижается на 20-30%, а в дальнейшем либо восстанавливает свои свойства, либо остается на таком же уровне. Авторы утверждают, что изменение вязкости в

промежутке килогерцового диапазона практически не зависит от частоты. Также наблюдается незначительное снижение эффекта с повышением частоты (400 кГц – 4,5 МГц). Необратимые изменения вязкости наблюдаются только при воздействии жидкости в течение нескольких часов с интенсивностью 100 кВт/м<sup>2</sup>. В этом случае уменьшается молекулярная масса нефти, изменяется структурный состав и увеличивается температура выпадения парафина [7].

Акустическое действие на призабойную зону скважины обеспечивает увеличение фильтрационных свойств пластов скважинного пространства за счет:

- разрушение отложений солей на стенках пор при акустической вибрации;
- устранение газовых пробок в капиллярах при акустической дегазации жидкости;

- разрушение тормозного электростатического слоя в капиллярах;

- снижение вязкости жидкости.

Технологическая обработка ПЗУ с использованием гидроакустических устройств позволяет производить повторное действие без подъема оборудования на устье и создавать импульсы давления, достаточные для разрушения кольматирующих слоев. Гидроакустическое действие обладает эффектом последствия, то есть положительный эффект сохраняется от нескольких недель до нескольких месяцев.

Исследователями разработаны различные конструкции гидроакустических устройств (генераторов) для интенсификации добычи углеводородов методом направленного действия на пласт, однако, как свидетельствует анализ этих конструкций, большинство из них базируется на использовании сопел Лавалья, которые не обеспечивают эффективность на больших глубинах и возможность регулирования частоты и интенсивности в процессе работы. Кроме того, недостаточно исследованы и выявлены влияние энергии акустических колебаний на структуру углеводородов, цементного камня, механические свойства горных пород, термобарические характеристики [7].

Особенностью технологии является многократное создание в зоне обработки пласта знакообразных импульсов давления, направленных в направлении скважины в пласт и наоборот. Под действием знакоменного давления происходит очищение пор и трещин ПЗУ, образуются утомительные напряжения в породах пласта, поэтому существует возможность образования и развития трещин. Создаваемые импульсы разрушают механические пробки, увеличивая проницаемость, а, следовательно, производительность пласта. Эффективность метода знакоменных импульсов давления в основном

определяется характером депрессии, то есть чем чаще создается депрессия, тем эффективнее влияние на пласт. При создании волн, действующих на пласт, наибольшему воздействию подвергается ПЗУ, так как гидродинамический импульс в породах затухает в зависимости от свойств насыщенных флюидов и вдали от скважины вследствие упругости системы и гидравлического сопротивления в фильтрационной зоне скважины.

Предлагаемое устройство создает пульсации низкой частоты, что приводит к усилению массовых перетоков между неоднородными частотами коллектора и способствуют распространению импульса, который раскольматывает эффективное пустотное пространство по объему пласта и разблокирует зоны, насыщенные нефтью и пластовой водой. Все эти физические процессы повышают скорость потока жидкости в капиллярах на 20-30% и позволяют решать основные технологические задачи добычи углеводородов [7]:

- повышение добычи из малодебитных скважин и поддержание дебита на стабильном уровне;

- вызов притока нефти и газа из простаивающих скважин и при освоении новых;

- увеличение приемлемости нагнетательных скважин;

- разрушение газожидкостных пробок и т.д.

Под действием упругих колебаний происходит очистка поровых каналов коллектора, устраняется блокирующее влияние остаточных фаз газа, нефти и воды, инициируется фильтрация флюидов в низкопроницаемых прослойках и зонах. В результате чего происходит повышение фазовой проницаемости для нефти и снижение воды, уменьшение межфазных напряжений на границах нефтевода и увеличение объемной газонасыщенности пластовых флюидов без их дегазации. Это приводит к многократному увеличению капиллярного и гравитационного вытеснения нефти водой.

Одним из важнейших преимуществ разработанного устройства является возможность комбинирования технологий акустического действия с другими видами воздействия, например тепловыми, химическими и т.п., значительно расширяющими область применения, в том числе на объектах с высоковязкой нефтью и другими нетрадиционными залежами углеводородов. Предлагаемое устройство позволяет:

- последовательно и эффективно действовать на ПЗУ и удаленные зоны пласта;

- совместно и одновременно действовать акустическим полем и кислотной обработкой и другими химическими стимуляторами;
- ликвидировать парафиновые пробки в НКТ;
- улучшить реологические свойства нефти (снижение динамической вязкости и др.).

Работа всех гидроакустических излучателей базируется на создании колебаний или при взаимодействии с потоком жидкости (струи), вытекающей из сопла с препятствиями определенных размеров и форм, или при принудительном периодическом прерывании струи. Механизмы излучения звука могут быть самыми разными и зависят от конструкции излучателя. Классификация акустических устройств представлена в таблице 1.3 [7].

*Таблица 1.3*

**Классификация акустических устройств**

Излучатель	Принцип действия	Технические характеристики	Область применения	Особенности эксплуатации
Гидроакустический	Превращение энергии потока жидкости или газа в энергию упругих колебаний	Диапазон частот – 100-10 000 Гц, предельное звуковое давление – 1-2 МПа, интенсивность – до 50 кВт/м <sup>2</sup>	Интенсификация разрушения горных пород; пеленгация текущего положения забоя скважины; повышение проницаемости при забойной зоне пласта; борьба с солеотложением солей в нефтепромышленном оборудовании	Крепится на насосно-компрессорные трубы. Работает в потоке жидкости
Самодвижущийся золотниковый вибратор	Превращение энергии потока жидкости или газа в энергию упругих колебаний	Частота зависит от скорости потока и расхода жидкости. Диапазон частот – 100-500 Гц, импульсное давление – до 15 МПа	Интенсификация добычи нефти	Сопровождается гидроударом

Продолжение табл. 1.3

Магнитострикционные	Превращение электрической энергии в акустическую с использованием эффекта магнитострикции	Диапазон частот – от 1 до 100-150 кГц, предельная интенсивность – до 50 кВт/м <sup>2</sup> . Электроакустический КПД – до 40%	Интенсификация добычи нефти; освоение скважин; опробование пласта; борьба с солеотложением в нефтепромышленном оборудовании	Генератор – наземный, излучатель – цилиндрический. Масса всей системы – 350 кг
Пьезокерамический	Превращение электрической энергии в акустическую за счет пьезоэффекта	Диапазон частот – от 1 до 100 кГц, интенсивность – до 50 кВт/м <sup>2</sup> . Электроакустический КПД – до 50-60%	Интенсификация добычи нефти; освоение скважин; опробование пласта; борьба с солеотложением в нефтепромышленном оборудовании	Генератор – глубинный, излучатель – стержневой. Масса всей системы – 50 кг.

## 1.2 Общие сведения об ультразвуковой технике

Ультразвуком называется механическая волна, вызванная взаимными колебаниями упругих частиц с частотами выше 20 кГц, т. е. за пределами диапазона человеческого слуха. В зависимости от частоты ультразвуковые волны делятся на одну из трех категорий: ультразвук мощности с частотой 20–100 кГц; ультразвук высокой частоты, с частотой от 100 кГц до 1 МГц; и диагностическое ультразвуковое исследование с частотами 1–500 МГц. Скорость распространения волны увеличивается с большей плотностью окружающей среды (т. е. Чем ближе расстояние между частицами). Таким образом, волны будут распространяться медленнее всего в газах, быстрее в жидкостях и быстрее всего в твердых телах. Источником искусственно генерируемого ультразвука является ультразвуковой генератор. Для ультразвука низкой интенсивности [4] к таким генераторам относятся свистки, камертоны и сирены, способные генерировать частоты <200 кГц. Для более высоких частот используются электромеханические (пьезоэлектрические) или магнитострикционные генераторы (преобразователи). Магнитострикционный преобразователь работает по принципу изменения размеров ферромагнитного материала при помещении его в переменное магнитное поле. Скорость распространения ультразвуковой волны зависит от упругости и плотности

среды, через которую она проходит [4]. Для воды скорость распространения ультразвуковых волн составляет 1480 м/с.

Ультразвуковые колебания могут генерироваться генераторами трех типов:

1. Механические (маленькие камертоны и свистки: низкая частота и мощность);

2. магнитострикционные (колебания вокруг железного стержня в магнитном поле электромагнита, питаемого переменным током: большой мощности, но с частотой только до 100 кГц — применяются в стоматологии и хирургии);

3. Пьезоэлектрический (кремниевая пластина, соединенная с электродами, к которым приложено переменное напряжение, которое колеблется с той же частотой, что и напряжение, преобразуя энергию из электрической в механическую, вызывающую колебания окружающей среды — используется в диагностических и терапевтических целях).

Высокая частота будет создавать очень коротковолновые ультразвуковые волны, где изменения давления на уровне МПа происходят с более высокой интенсивностью.

1. Механические воздействия: Прохождение ультразвуковой волны через окружающую среду приводит к локальным изменениям давления (МПа/мм). Механические волны, а значит и звук, распространяются во всех состояниях вещества через связи между частицами. Когда энергия колебательного движения передается соседним частицам и приводит к распространению колебаний, то среда характеризуется как упругая.

2. Физико-химический: Ультразвук обладает дисперсионным действием, что означает, что с его помощью можно приготовить мелкодисперсные суспензии, эмульсии, пены и т. д. в дополнение к коагуляционным эффектам (например, использовать для очистки газов).

3. Биологический: до интенсивности 3 Вт/см<sup>2</sup> ультразвук имеет биопозитивные эффекты, такие как ускорение метаболического обмена. При интенсивностях более 3 Вт/см<sup>2</sup> эти эффекты приводят к необратимым морфологическим изменениям, таким как распад клеточного ядра и термическая коагуляция белков.

Одним из ограничивающих факторов при использовании ультразвуковых волн для санации добывающих скважин является глубина проникновения волны через окружающую среду, которая находится в обратной зависимости от частоты

ультразвуковой волны. Для обсадной и гравийной засыпки это на практике составляет 25–35 см, что соответствует расстоянию, на котором амплитуда волны падает до половины исходного значения в данной среде. В принципе, в жидкостях и твердых телах поглощается меньше кинетической энергии, чем в газах. Воздействие ультразвука бывает механическим и тепловым. Распространение ультразвука через среду вызывает вибрацию молекул среды, что приводит к быстрым изменениям давления. При прохождении ультразвука через органические ткани большая часть энергии преобразуется в механическую энергию, вызывая вибрацию тканей и приводя к изменению свойств клеточных мембран (физико-химический эффект). расщепление высокомолекулярных веществ (химический эффект) [4] и поглощение механической энергии (биологический эффект).

При реабилитации скважин с использованием ультразвуковой технологии используются четыре основных процесса:

1. Удаление твердых отложений из-за различий в деформации зерен гравийного фильтра и поверхностных осадителей. Это вызвано разницей в механической деформации на границе раздела материалов.

2. Разжижение органических молекул под действием механического напряжения, вызванного ультразвуком, превращает большие органические молекулы в более мелкие. Этот процесс дает определенную степень летальности для вирусов и бактерий.

3. Энергия ультразвука приводит к движениям в молекулярной структуре инкрустации. Следовательно, внутри гравия происходит истирание, которое стачивает покрытие.

4. Кавитация. Так называемый кавитационный эффект действует на глубине примерно до 50 м. Кавитация удаляет материал, прилипший к поверхности гравия.

### **1.3 Общие сведения о воздействии ультразвука на жидкость пласта**

#### **1.3.1 Ультразвуковое снижение вязкости нефти**

Сильные кавитационные эффекты при использовании ультразвуковой технологии для высоковязких нефтей позволяют добиться сокращения количества тяжелых крупных молекул, таких как асфальтены и крупные коллоидные частицы. Что в свою очередь ведет к снижению молекулярной массы, а значит, к снижению вязкости. Измерения динамической вязкости сырой нефти под действием ультразвукового поля Чжена Дзяхуна [5,6] показали, что

вязкость нефти снижается на 20-25% после ультразвуковой обработки в течение 30-60 мин. С учётом того, что акустический метод позволяет добиться улучшения реологических свойств нефти, а также оказывает благоприятное влияние на призабойную зону, был проведен ряд расчётов российскими исследователями [5], которые показали, что ультразвуковое воздействие позволяет добиться: увеличения в 2 раза коэффициента продуктивности; увеличения среднесуточного дебита скважин в 2,5 раза; уменьшения среднего значения обводненности – на 26%.

### **1.3.2 Ультразвуковое удаление отложений**

Вибрация создает колебания ультразвуковой частоты, которые воздействуют на парафиновые кристаллы в области парафинообразования и вызывают их перемещения, что не позволяет кристаллам осаждаться на стенку нефтепровода. Ультразвуковая технология эффективно показывает себя при удалении и предотвращении образования парафиновых отложений в нефтепроводах и загрязнений пласта вблизи ствола скважины, тем самым уменьшить скин фактор на 25%. Установлено, что колебания вызывают тепловой эффект, разрушают отложения парафина, причём, чем выше частота колебаний, тем эффективнее воздействие.

### **1.3.3 Ультразвуковая деэмульсация и обезвоживание**

Деэмульсация и обезвоживание с помощью акустического воздействия подразумевает возникновение конденсации и снижение вязкости под влиянием волн ультразвука, что позволяет каплям воды соединяться в сырой нефти. Это, в свою очередь ускоряет процесс разделения фаз нефти и воды в эмульсии. В японском патенте [5] говорится, что содержание воды в нефти морских загрязнений составляет всего 1,45 % (масс.) после одночасовой ультразвуковой обработки при температуре 80°C. В то время, как при использовании термического осаждения в течение 1 часа содержание воды более 31,5 %. Оптимальное время ультразвукового воздействия составляет 10-15 минут. Эффект от ультразвуковой и химической деэмульсации и обезвоживания может достигать более 60 % (происходит снижение количества эмульсии с 76% до 19%). Интенсивность ультразвука – это главный фактор, который влияет на ультразвуковое деэмульгирование – чем выше частота колебаний, тем сильнее воздействие.

### **1.3.4 Ультразвуковая очистка от накипи**

Воздействие ультразвуковых колебаний на поверхность труб,

подверженных образованию накипи на поверхности, способно предотвратить и разрушить уже сформировавшиеся образования. Эффект кавитации, вызванный ультразвуком, может разрушить накипь кристаллов соли до крошечных взвешенных частиц в среде, таким образом, эти крошечные частицы могут стекать вместе с потоком жидкости. Благодаря образующимся в результате акустического воздействия центрам кристаллизации, которые находятся в постоянном перемещении/смещении, осаждение кристаллов и их последующий рост значительно затрудняется. Образуется тонкодисперсный шлам по некоторому объёму флюида, который выносится с потоком. Таким образом происходит нарушение условий кристаллизации, и, как следствие, прекращение отложений, либо разрыхление образующейся накипи. Разрушение уже накопленных солевых отложений происходит за счёт образования микротрещин, которые по мере своего роста прочищают оборудование [5].

#### **1.4 Ультразвуковое улучшение проницаемости пористой среды**

Ультразвуковая техника – недорогая и экологически чистая технология, обычно используемая в нефтегазовой промышленности для повышения нефтеотдачи, и ее применение было успешно протестировано как в лабораторных, так и в полевых условиях. В этом методе мощные ультразвуковые волны используются в скважине для повышения нефтеотдачи и уменьшения повреждения пласта в призабойной зоне скважины, что приводит к снижению дебита углеводородов из-за проникновения бурового раствора, отложений накипи и т. д. Барьеры для потока нефти в ствол скважины эффективно устраняются с помощью ультразвуковой техники, а эффект повышения нефтеотдачи может длиться до нескольких месяцев.

Учитывая изложенное, работа в сфере создания новых комбинированных физико-химических методов повышения эффективности добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов приобретает важное народнохозяйственное значение. Экологически безопасное УЗ воздействие представляется при этом весьма актуальным для решения практически всего комплекса этих проблем [6]. Во всевозможных исследованиях диапазон частот проведения ультразвука был от 20 до 125 кГц, а интенсивность ультразвука от 30 до 2000 Вт и время до 240 мин. Исследования показали способность ультразвука мобилизовать остаточную нефть, увеличивать проницаемость коллектора и улучшать качество нефти восстановление. Самыми важными факторами, который необходимо учитывать в процессе применения УЗ для

обеспечения успешного достижения максимально эффекта – это влияния частоты волн и выходной мощности. Увеличение выходной мощности (интенсивности) волн увеличивает нефтеотдачу, а увеличение частоты волн ускоряет добычу нефти; тем не менее, конечная нефтеотдача была одинаковой для волн разной частоты. Например, применение ультразвука увеличивало извлечение нефти вазелина на 10%, 14% и 17% для выходных мощностей 100, 200 и 400 Вт соответственно. С другой стороны, для выходной мощности 100 Вт при времени обработки 200 мин восстановление волн 25 кГц составило 51% PV, тогда как оно составило 53% и 57% для волн с частотой 40 и 65 кГц, соответственно [6].

Проницаемость является одной из важных характеристик ПЗП. Скин-фактор помогает оценить изменчивость проницаемости. Этот параметр объясняет наличие зоны с изменяющейся проницаемостью вокруг скважины. Для того, чтобы преодолеть скиновое сопротивление необходимо создать повышенное давление, что ограничено энергетическими возможностями пласта. Из-за этого продуктивность уменьшается. Из этого следует, что, скин-фактор – это мера дополнительной депрессии, необходимая для преодоления загрязнённой зоны [17].

Впервые кто ввели понятие скин-фактор - Херст и Ван-Эвердинген. Они заметили отличие реальных значений депрессии от расчётных теоретических [18]. Ниже приведена зависимость для оценки скин-фактора:

$$S = \frac{k \cdot h \cdot \Delta P}{141,2 \cdot Q \cdot \mu \cdot B}, \quad (1.1)$$

где  $k$  – проницаемость пласта, мкм<sup>2</sup>;  $h$  – толщина пласта, м;  $\Delta P$  – депрессия, Па;  $Q$  – дебит скважины, м<sup>3</sup>/сут;  $\mu$  – вязкость жидкости, мПа·с;  $B$  – объёмный коэффициент жидкости, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

К снижению дебитов нефти добывающих скважинах и приемистости в нагнетательных скважинах приводит снижение проницаемости ПЗП. За счет создания дренажных каналов, увеличения трещиноватости пород, удаления из призабойной зоны пласта АСПО, примесей и т.д. улучшают проницаемость пород ПЗС [19].

За все время разработки извлекаемый объем жидкости и газов из пласта проходит через ПЗС. Вследствие радиального характера притока жидкости в этой зоне возникают максимальные градиенты давления и максимальные скорости движения. Так же к наибольшим потерям пластовой энергии приводят фильтрационные сопротивления [19].

Для обработки ПЗП применяются волновые методы, которые связаны с ультразвуковым воздействием (частота излучателя примерно 20 кГц и более). Сейсмоакустическое воздействие, которое реализует волновое излучение на низких частотах (до 100 Гц) применяется для площадного воздействия на продуктивные пласты.

Из-за загрязнения ПЗП сложным по составу кольматантом осложнились проблемы с массовым проведением гидроразрыва пласта (ГРП) на месторождениях. Существующие методы, которые восстанавливают продуктивность скважин, чаще всего оказываются низкоэффективными, что связано с несоответствием выбора скважины и технологии работы, а также со сложностью решения поставленных задач. По результатам ученых наиболее эффективными являются волновые методы с применением гидромониторов, работающие от потока скважинной жидкости и создающие низкочастотные упругие колебания давлений. Лабораторные эксперименты на кернах, где под воздействием глинистого раствора проницаемость снижалась на 60% (ее восстанавливали обратной промывкой, гидромониторной обработкой и гидроимпульсным воздействием), показали, что восстановление после гидроимпульсной обработки было наибольшим и составляло 85% и оптимальная частота составляла 1-20 Гц [19].

Сущность волновых методов увеличения нефтеотдачи пластов заключается в формировании для увеличения объема извлекаемого из недр углеводородного сырья и снижению энергетических затрат [20].

Чтобы увеличить суммарный объем добычи нефти из пласта, темп добычи и улучшить качество добываемой продукции, необходимо применять методы обработки ПЗП. Существует множество методов, восстанавливающих продуктивность скважин, но как было указано выше, чаще они являются неэффективными.

Акустическое воздействие (АВ) на ПЗС можно отнести к числу перспективных методов. Подтверждают это известные явления и эффекты, способные оказывать положительное влияние на ПЗП вышерассмотренных проблем.

Положительный эффект АВ на продуктивный пласт возникает на горную породу в процессе воздействия упругих колебаний и сопровождается большим числом вторичных эффектов, имеющих разную зависимость от интенсивности частоты колебаний и различную физическую природу.

Для акустической стимуляции скважин существует оборудование с двумя

вариантами колебательных систем: СП 108/1410 для работы с высокопарафинистой нефтью и СП- 42/1300 для работы в нефтяных скважинах.

В работе [20] по практическим результатам автор пришел к выводу, что при подготовке к проведению работ по АВ важно провести тщательный анализ всей истории работы скважины, включающая информацию о режимах эксплуатации скважины за весь период, о ее конструкции, а также характеристику нефтегазонасыщенной части пласта (тип коллектора, пластовое и забойное давление, пористость, интервалы перфорации, проницаемость, дебит, профиль притока).

Метод ультразвуковой тоже прошёл проверку на месторождениях Татарстана, Удмуртии, Западной Сибири, Республики Коми и Белоруссии. Положительный эффект подтверждается на нагнетательных, добывающих, фонтанирующих нефтяных, нефтегазоконденсатных, и даже на артезианских скважинах питьевой воды.

УЗ-воздействие основано на мощном акустическом излучении в пласт. Развивающиеся процессы кавитации в окружающей среде, связанные с ростом и схлопыванием пузырьков газа, а также наблюдается тепловой интенсивный разогрев породы и жидкости.

УЗ обработка призабойной зоны скважины увеличивает проницаемость и текучесть флюида, вследствие расколматации каналов коллектора от АСПО, частиц песка, бурового раствора и др. УЗ метод использует поля частотой 18 - 35 кГц с интенсивностью до 1 Вт/см<sup>2</sup>, при этом рабочая резонансная частота излучателей скважины примерно равна 18-24 кГц при этом интенсивность ультразвука на оси скважины достигает 0,1 Вт/см<sup>2</sup> на расстоянии 1 м от оси скважины составляет примерно 0,02 Вт/см<sup>2</sup>.

Для очищения ствола скважины от различных загрязнений, также применяют УЗ, который эффективно удаляет барьеры для потока нефти в скважину. В 40–50% изученных случаев ультразвуковой метод считается успешным и эффект ультразвуковой генератор может продолжаться до нескольких месяцев. Также этот метод имеет очень локальный эффект.

Как показано в работе [20] эффекту снижения вязкости нефти, которая нагрета до температур 40-50°С аналогично УЗ-воздействие при 25°С, при этом происходит интенсивное увеличение текучести высоковязких нефтей при воздействии упругих волн продолжительностью до 1 часа и снижение вязкости в 6 раз.

По результатам расчёта доказано, что УЗ-воздействие меняет

распределение равновесной концентрации тяжелых углеводородов на пористую матрицу и пористости. Это влияет на улучшение протекания нефти через поры, к увеличению объема вышедшей из пористого коллектора нефти, а также к повышению коэффициента извлечения нефтеотдачи, больше чем на 30%.

Виброволновое воздействие (ВВ) на ПЗС тоже можно отнести к числу перспективных методов.

Сущность технологии заключается в обработке ПЗП промывочной жидкостью, поток движения которой пульсационный. Частота 1-3 Гц, а давление изменяется в пределах от 1 до 6 МПа. В результате анализа геологических условий и опыта разработки прошлых лет был составлен технологический план, состоящий из нескольких этапов. На первом разрушается структура загрязнения с помощью гидравлических импульсов. На следующем этапе кислотная обработка (КО) растворяет загрязняющие частицы. На заключительном этапе создается депрессия (для добывающих скважин) или репрессия (для нагнетательных), чтобы очистить или вытеснить в пласт частички загрязнения.

В работе [20] на практике Западной Сибири сравнивались эффективность от применения виброволновой технологии и КО, а затем ГРП. Были продемонстрированы три скважины, одна из которых была проблемной, из-за большого поглощения бурового раствора, что повлекло за собой низкую продуктивность. Эффект от применения виброволновой технологии был положителен на более длительное время, чем эффект от КО, а затем ГРП. Прирост нефти также повысился до 6 т/сут. Технологическая схема ВВ представлена на рисунке 1.6.

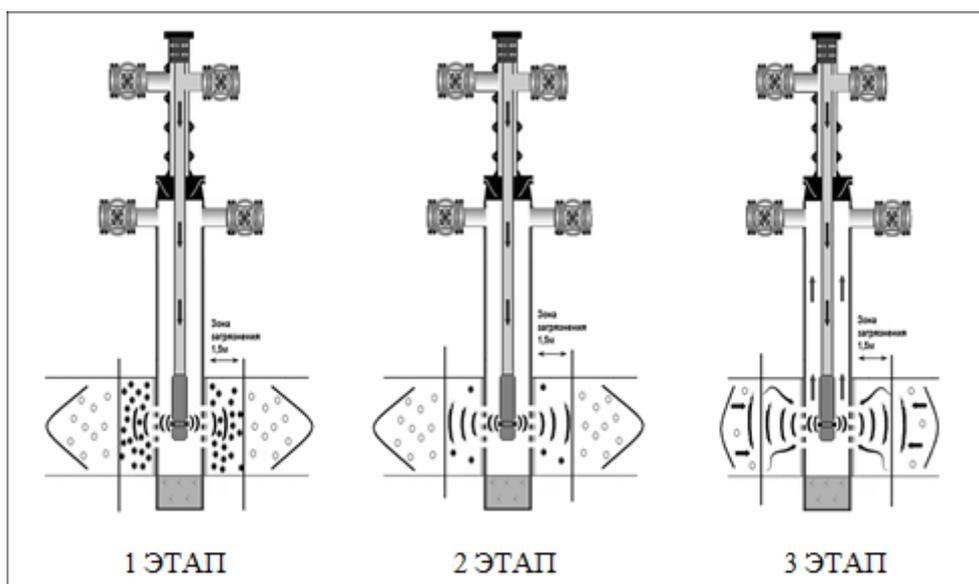


Рисунок 1.6 – Схема метода воздействия на ПЗП [20]

Таким образом, после обработок по виброволновой технологии очагов заводнения участков пласта происходит увеличение приемистости скважин и повышение охвата пласта по толщине. К работе подключаются новые пропластки, которые не освоены после бурения или загрязнены в ходе эксплуатации, а также улучшаются общие характеристики заводнения участков.

Способ интенсификации добычи нефти волнового действия на продуктивный пласт является одним из перспективных. Данная технология не требует дорогостоящих оборудования и химических соединений, выполняется с помощью штатного нефтепромыслового оборудования. Не происходит загрязнения окружающей среды. Волновое действие которое используется как метод обработки призабойных зон добывающих и нагнетательных скважин впервые было проведено на месторождениях нефти еще в 1960 году, и сразу же получило достаточно положительные данные по его эффективности технологии. Но вскоре опыт показал, чтобы достичь высокого успеха и рентабельности метода от его применения в осложненных геолого-промысловых условиях эксплуатации скважин важно проведение целого ряда лабораторных, теоретических и промышленных исследований.

В статье [20] показано, что разные ученые подходили к процессу поразному, но пришли к тому, что процессы действия упругими колебаниями на ПЗП с целью повышения продуктивности скважин и привлечения понятий градиентов давления. Эти градиенты давления в ПЗП создаются скважинными или наземными гидравлическими генераторами упругих колебаний. Анализ процессов действий упругими колебаниями на ПЗП с привлечением понятий градиентов давления является правомерным в связи с тем, что рассматриваются процессы, проходящие в скважине и в зонах пласта с линейными размерами, которые не превышают волновое движение упругих колебаний с частотами от единиц до нескольких тысяч Герц.

Важным этапом предвыбора метода ОПЗ является необходимость произведения ряда геофизических и гидродинамических исследований, чтобы выяснить причины снижающие фильтрационные свойства ПЗП. Также при проведении исследований важно изучить свойства и состав флюида, насыщающего горную породу, и собственно физико-химические свойства продуктивной горной породы. К кандидатам на ОПЗ относятся следующие скважины после бурения; которые не вышли на режим, из-за отложений; с низкими показателями после ГРП; которые долгое время были в бездействии;

которые находятся длительное время в эксплуатации, приток к которым начал снижаться.

Проведя анализ можем выделить некоторые преимущества от метода АВ такие как, простота применения в полевых условиях, отсутствие вредного влияния на геологическую структуру пластов, низкая энергоемкость, возможность использования других методов и технологий интенсификации до и после применения АВ, экологическая чистота.

Малый радиус является сновным незначительным минусом ультразвуковой технологии, так как глубина проникновения, воздействия, определяется несколькими сантиметрами. Связано это с интенсивным поглощением энергии высоких частот в насыщенных средах.

От других технических решений, которые обеспечивают квазистационарный режим воздействия на призабойную зону, эту технологию отличает импульсный режим воздействия. Импульсный режим многократного циклического изменения давления при прохождении фронтов упругих волн накладывается на стационарный режим заведения, например, в системе поддержания пластового давления месторождения. Микроградиенты давления, которые возникают при этом при интегрировании во времени и по площади участка месторождения создают непрерывно изменяющееся векторное гидродинамическое поле, фильтрационные процессы в котором интенсифицируются.

Влияние упругих колебаний на фильтрацию пластовых жидкостей заслуживает особого внимания. Кроме выше рассмотренных явлений изменения вязкости, проницаемости и др., которые влияют на фильтрацию посредством изменения самих свойств флюидов, экспериментально наблюдаются специфические «фильтрационные» эффекты. Это, например, весьма значительное (почти двадцатикратное) увеличение относительной скорости фильтрации воды или обычной ньютоновской нефти через модели кернов песчаника при наложении поля интенсивных упругих колебаний в несколько сотен киловатт на  $1 \text{ м}^2$ , на частотах 3-10 кГц, увеличение до 10 раз неполярных жидкостей и скорости фильтрации полярных, электролитов и диэлектриков в поле колебаний интенсивностью  $1,9 \text{ кВт/м}^2$  и частотой 17 кГц, увеличение почти на два порядка скорости фильтрации дистиллированной воды и растворов солей через керны пород при воздействии колебаниями частотой 26,5 кГц. Объяснить полученные результаты исследований можно разрушением поверхностных облитерационных слоев в поле упругих колебаний, увеличивающее эффективное

сечение мелких пор и уменьшающее сопротивление течению в них жидкости.

Высокоамплитудные пульсации давления флюидов, насыщающих пористую среду, вызывают необратимое увеличение абсолютной проницаемости за счет процессов образования новых и раскрытия старых микротрещин, разрушения и дезинтеграции кольматирующего материала. Распространение пульсаций увеличивает фазовую проницаемость нефти за счет воздействия на реологические характеристики пластовой нефти [3]. Для того, чтобы оценить влияние УЗ на изменения проницаемости автор применил в расчете следующую формулу:

$$K_{ак} = K_0 \left[ 1 + 0,7 \left( \frac{P_0 \sqrt{\frac{r_c}{r}} \cdot \exp(-\alpha \cdot (r - r_c))}{0,05 \cdot \frac{P_k - P_c}{r \cdot \ln \frac{R_k}{r_c}}} \right) \right], \quad (1.2)$$

где  $k_{ак}$  – проницаемость пористой среды при воздействии на нее упругих колебаний  $m^2$ ,  $K_0$  – начальная проницаемость пласта,  $r_c$  – радиуса скважины,  $R_k$  – радиус контура питания,  $r$  – расстояние от источника колебаний до точки, в которой определяется амплитуда, расстояние  $r$  изменяется в пределах от  $r_c$  до  $R_k$ ,  $P_0$  – начальное значение акустического давления,  $c$  – скорость продольных волн, которая обычно равна 3.4 км/с,  $\alpha$  – коэффициент затухания акустической волны.

Полученный результат представлен на рисунке 1.7. Из рисунка видно, что проницаемость среды при прямом воздействии упругих колебаний возрастает в несколько раз и быстро падает при увеличении расстояния от излучателя, приближаясь к начальному значению.

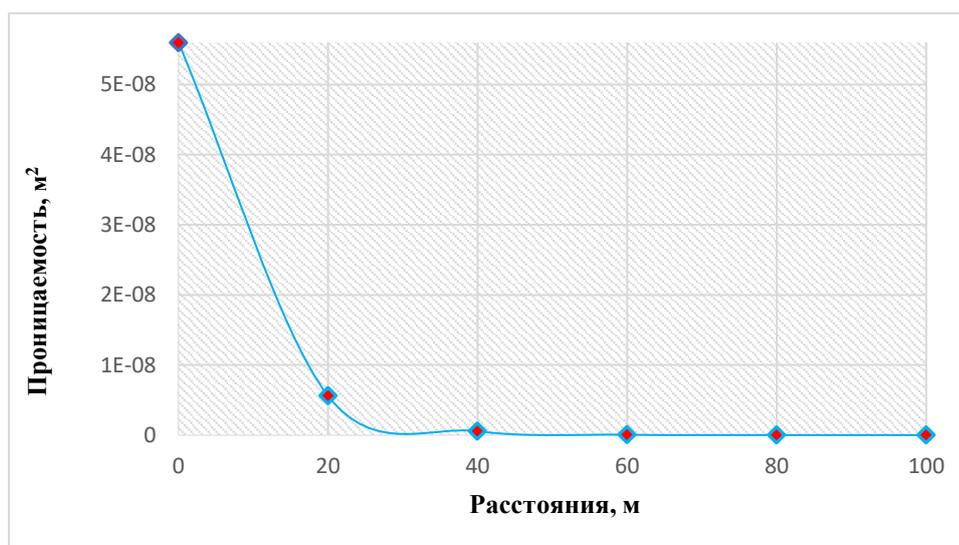


Рисунок. 1.7 – График зависимости проницаемости от расстояния

Кроме того, при распространении акустических волн в насыщенной пористой среде увеличивается ее эффективная теплопроводность.

Физика явлений, происходящих в пласте в процессе акустического воздействия, может быть объяснена в рамках модели Био в соответствии с которой в насыщенной пористой среде распространяются две продольные волны. Одна из них - продольная волна первого рода – волна сжатия, вторая – продольная волна второго рода связана с колебательными движениями флюида относительно скелета породы. В отличие от продольной волны первого рода, волна второго рода быстро затухает, однако как было показано, она непрерывно генерируется волной P1 на неоднородностях. Согласно этой теории, на частотах, выше некоторой критической частоты, возникает эффект кажущегося снижения вязкости. В результате, проницаемость пласта по воде или нефти растет и стремится к значению его проницаемости по газу, что подтверждается результатами проведенных ранее экспериментов.

В работе [8] изучали влияние мощности, частоты и времени ультразвукового возбуждения на ультразвуковую обработку отложений неорганических отложений в призабойной зоне скважины. Они обнаружили, что чем выше мощность ультразвука и время возбуждения, тем лучше процесс очистки ствола скважины. Они показали, что оптимальное время обработки составляет около 80–120 мин.

Эксперименты с применением ультразвука на образцах керна, поврежденных парафином и отложениями накипи, показали, что керн проницаемость может быть увеличена [9]. Было обнаружено, что эффективность ультразвука зависит от частоты и мощности приложенного звукового поля. Например, увеличение частоты и мощности примерно на 40 кГц и 1000 Вт соответственно может улучшить обработку сердечника, но повреждение сердечника может также произойти на частотах выше 40 кГц.

В исследовании работе [7] использовали ультразвуковых волн для удаления отложений NaCl рассматривается в лабораторных масштабах. Экспериментальные результаты показывают, что этот метод эффективно удаляет эти отложения и может рассматриваться как новая технология в нефтяных и газовых скважинах. Для проведения экспериментов были использованы 20 образцов керна из резервуаров на юго-западе Ирана с различным диапазоном проницаемости

Керны были полностью насыщены рассолом (NaCl + деионизированная вода) с концентрацией 220.000 частей на миллион в ячейке под давлением 4000

фунтов на квадратный дюйм в течение 4 дней. Для обработки результатов закачки воды с ультразвуковым излучением и без него в насыщенных образцах керна был выбран тонкий слой насыщенного образца керна как при ультразвуковом излучении, так и при нагнетании воды, который был проанализирован с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рисунок 1.8 показаны СЭМ-изображения тонкого слоя образца керна, подвергнутого исключительно закачке воды. Рисунок 1.9 показывает, что частицы NaCl, подвергнутые воздействию ультразвуковых волн, демонстрируют значительные структурные изменения, включая микротрещины и трещины.

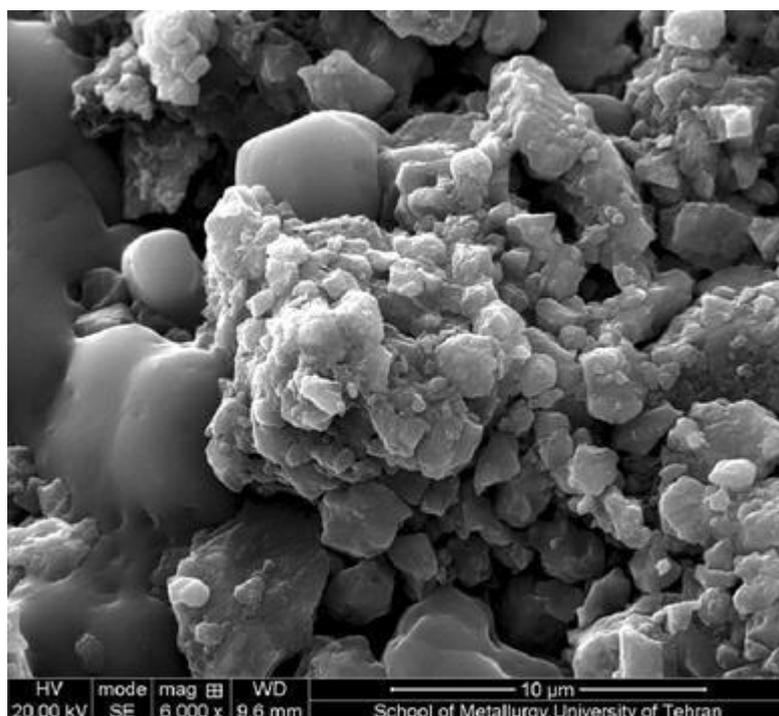


Рисунок 1.8 – Кристаллы NaCl из-за закачки воды [7]

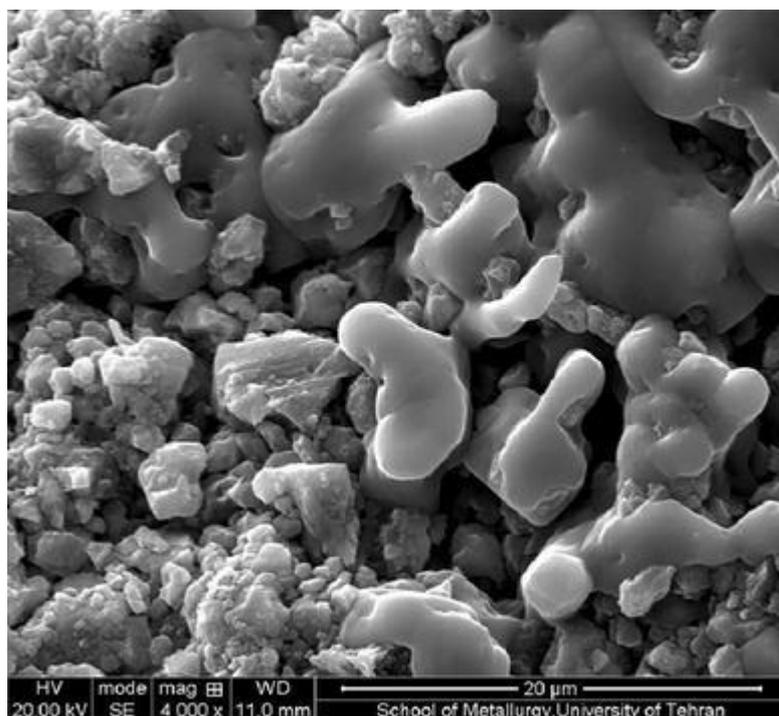


Рисунок 1.9 – Кристаллы NaCl из-за излучения ультразвуковых волн [7]

Закачка воды изменила структуру кристаллов хлорида натрия; однако изменения в кристалле хлорида натрия более выражены. Фактически структура кластера почти не изменилась; небольшие изменения, наблюдаемые в частицах NaCl. Ультразвуковые волны из-за своего механического воздействия сильно изменяют эти шкалы. Как показано на рисунке 1.8, кристаллическая структура хлорида натрия была полностью разрушена, что привело к повышению его растворимости в воде и отделению от скелета породы. В конечном итоге это улучшает проходимость.

### **1.5 Анализ волнового воздействия на изменение реологической характеристики тяжелой нефти**

Проблема образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на поверхностях внутрискважинного оборудования и промышленных транспортных коммуникаций при механизированной добыче нефти на всех стадиях разработки месторождений является на сегодняшний день наиболее острой, наиболее емкой в плане материальных затрат. Вред от АСПО приводит к порче нефтедобывающего оборудования, затрудняет и замедляет добычу нефти, загрязняют скважины [12].

Проблему образования АСПО можно также связать с тем, что многие из месторождений в России находятся на поздней стадии разработки,

характеризующейся высокой обводненностью продукции. С увеличением обводненности может наблюдаться увеличение доли смол и асфальтенов в добываемой нефти и, следовательно, повышение вероятности образования АСПО в подземном оборудовании [11].

Результаты [2] гранулометрического состава асфальтенов показывают, что увеличение продолжительности волнового излучения приводит к уменьшению диапазон размеров частиц асфальтенов для образцов под воздействием ультразвукового излучения. Ультразвуковые волны полностью изменяют структуру частиц асфальтенов, создавая кластеры асфальтенов с другой структурой. Основываясь на инфракрасных спектрах с преобразованием Фурье, волновых методов (ВМ) увеличивают скорость растрескивания более слабых полос и конденсацию алифатических полос, из-за увеличения интенсивности спектров [2].

На сегодняшний день нефтяная промышленность не нашла комплексного решения проблемы отложения асфальтенов. Существующие решения носят временный характер, и потребность нефтяной промышленности в добыче нефти из залежей тяжелой нефти делает проблемы, вызванные отложениями асфальтенов, невероятно важными [8].

Практически любое изменение физического или химического равновесия нефти может вызвать отложение асфальтенов. Наиболее частые изменения [2, 3]:

1. Миксирующие жидкости разной температуры и состава.
2. Впрыск газа и изменение РН.
3. Влияние сильных электрических зарядов и химического вещества.
4. Падение давления и температуры.

Частицы асфальтенов растворимы в низкомолекулярных ароматических соединениях (таких как бензол или толуол) и нерастворимы в низкомолекулярных алканах (таких как н-гептан или н-пентан); эти алканы в наибольшей степени стабилизируют эмульсии в точке осаждения или около неё [4]. Были проведены многочисленные исследования, моделирующие образование отложений асфальтенов и кинетическую растворимость этих осадителей в различных растворителях. Например, [8] изучили агрегацию и поведение растворимости асфальтена и его субфракций.

Для управления отложениями асфальтенов также используются механические методы, включая продувку трубопроводов, канатных насосно-компрессорных труб и скребков (содержащих стержень, трос, гидравлический

трубопровод и свободно плавающий поршень), но они имеют ряд существенных недостатков [1, 2]:

1. Высокая стоимость эксплуатации.
2. Ограничения на использование некоторого оборудования.
3. Длительный срок.
4. Опасность вывоза инструментов.
5. Возможность засорения перфорационных отверстий.

Следовательно, существует потребность в технологиях, которые могут эффективно удалять отложения асфальтенов в коллекторах тяжелой нефти. Комбинация двух (или более) описанных выше методов (например, механического и химического) может быть объединена для образования эффективного решения. УЗ-обработка может быть непрерывной фазой для обеспечения адгезионных и пластичных свойств диспергированных асфальтенов. УЗ-излучение уменьшает размер кластеров асфальтенов, таким образом увеличивая суспензию асфальтенов в сырой нефти и уменьшая или предотвращая его склонность к выпадению в осадок [7]. В других исследованиях сравнивалась эффективность УЗ-волн в предотвращении образования асфальтенов в сырой нефти с разной плотностью. Было показано, что облучение УЗ изменяет реологию асфальтеновой сырой нефти, что может быть связано с изменениями в сырой нефти химические и физические свойства, вызванные обработкой ультразвуком [5]. В работе [6] обнаружили, что обработка УЗ может изменить среднюю структуру остатка, а изменения содержания и структуры асфальтенов являются основными причинами, ведущими к изменению свойств нефти [6].

В этом обзоре изучалось влияние ВМ на компоненты и вязкость тяжелой сырой нефти. Согласно работам [1, 2, 4, 12, 13] влияние этих волн на размер частиц асфальтенов и структуру кластеров асфальтенов с использованием анализа микроскопических изображений, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и инфракрасных спектров с преобразованием Фурье (FTIR). По результатам [9] этого исследования мы можем показать, как использовать технологии, применяя УЗ, для улучшения добычи из залежей тяжелой сырой нефти за счет снижения вязкости и удаления отложений асфальтенов.

По мнению авторов [17, 18]. При волновом воздействии наиболее значимыми являются следующие процессы: изменение пустотного пространства породы за счет образования новых путей фильтрации и увеличения

проницаемости пород; изменение деформационных и прочностных свойств нефтяных коллекторов; интенсификация физико – химических взаимодействий между ингредиентами породы и жидкой фазы, которая содержится в порах коллектора, что в свою очередь приводит как к положительным, так и отрицательным последствиям. Нарушение эксплуатационных характеристик пласта является одной из основных проблем для введения в строй новых скважин. Нарушения могут происходить по нескольким причинам, в том числе закупорки капилляров и пор скелета пласта, выпадение осадков в пласте вследствие взаимодействия с буровым раствором, осаждение асфальтенов, проникновения механических частиц или наличие глины в продуктивных пластах. Эти негативные факторы в основном снижают рентабельность разработки месторождений и иногда увеличивают эксплуатационные расходы [20].

### **1.5.1 Изменение реологических характеристик пластовой жидкости в акустическом поле**

Если в сплошной среде – газах, жидкостях или твёрдых телах – частицы среды окажутся выведенными из положения равновесия, то упругие силы, действующие на них со стороны других частиц, будут возвращать их в положение равновесия. При этом частицы будут совершать колебательное движение. Распространение упругих колебаний в сплошной среде представляет собой волнообразный процесс. Колебания с частотой от единиц до 20 Гц называются инфразвуковыми, при частоте от 20 Гц до 16–20 кГц колебания создают слышимые звуки. Ультразвуковые колебания соответствуют частотам от 16–20 кГц до 108 МГц, а колебания с частотой более 108 МГц получили название гиперзвуков [9].

Физическая природа упругих колебаний одинакова во всем диапазоне частот. Для понимания природы упругих колебаний рассмотрим их свойства. Форма волны – это форма волнового фронта, т.е. совокупности точек, обладающих одинаковой фазой. Колебания плоскости создают плоскую звуковую волну, если излучателем служит цилиндр, периодически сжимающийся и расширяющийся по направлению своего радиуса, то возникает цилиндрическая волна. Точечный излучатель, или пульсирующий шарик, размеры которого малы по сравнению с длиной излучаемой волны, создает сферическую волну.

Вследствие кавитации пузырьки микронных размеров образуют и растут из-за чередования положительных и отрицательных волн давления в растворе. Пузыри, подвергнутые этим переменным волнам давления, продолжают расти

до тех пор, пока они не достигнут резонансного размера. Как раз перед пузырьковой имплозией, существует огромное количество энергии, хранящейся внутри самого пузыря [9].

Связь между перепадом давления в пузырьке и перепадом температуры, необходимой для формирования пузырька, выражается формулой [9, 10].

$$\Delta T = \frac{\Delta p \cdot \Delta n}{\Delta H \cdot d_n} \quad (1.3)$$

где  $\Delta H$  — скрытая теплота фазового перехода;  $d_n$  — плотность пара;  $\Delta p$  — капиллярное давление.

Отсюда следует, что температура внутри пузырька (которая всегда выше, чем температура насыщения пара при давлении  $p$ ) может быть определена как температура насыщения, соответствующая давлению  $\Delta p$ . Таким образом, чем меньше размер пузырька, тем на большую величину надо перегреть жидкость, чтобы ее превратить в пар. В этом случае затрачивается минимальная работа для образования пузырька [9].

Температура внутри кавитирующего пузырька может быть чрезвычайно высокой при давлении до 500 атм. Процесс схлопывания, когда он происходит вблизи твердой поверхности, превращает пузырь в струю примерно на одну десятую размера пузырька, которая движется со скоростью до 400 км/ч к твердой поверхности. Благодаря сочетанию давления, температуры и скорости струя освобождает загрязняющие вещества от их связей с подложкой. Из-за небольшого размера струи и относительно большой энергии ультразвуковая очистка обладает способностью проникать в небольшие щели и эффективно удалять захваченные отложения [9].

В работе [11] показано, что если образец раствора асфальтенов, в котором идет процесс агрегации, подвергнуть перемешиванию или ультразвуковому диспергированию, то можно разрушить образовавшиеся к этому времени асфальтеновые агрегаты до размеров, с которых начинался рост этих агрегатов, фиксируемый методом динамического рассеяния света (ДРС). При этом разрушенные агрегаты стремятся снова к ассоциации.

Одним из эффектов, который наблюдался экспериментально в акустическом поле интенсивностью 8–100 кВт/м<sup>2</sup>, является изменение вязкости свободной нефти [9]. Снижение вязкости достигает 20–30 % и объясняется разрушением циклических структур за счёт интенсивных колебательных процессов, а также нагревом нефти и содержащихся в ней парафинов, вызванным диссипацией акустической энергии.

В работе [12] предложено использование УЗ и микроволновых эффектов для удаления асфальтенов и парафинов, которые выпадают из сырой нефти и прилипают к стволу горизонтальных скважин. Зависимость вязкости трёх жидкостей от времени УЗО (30–120 с) показало следующее: вязкость сырой нефти и асфальтенов уменьшается до 60 с УЗО, а затем начинает увеличиваться; после УЗО вязкость парафинов уменьшается до 30 с, а затем также начинает увеличиваться. Авторы объясняют это двумя противодействующими факторами: по мере увеличения времени УЗО температура увеличивается, что приводит к снижению вязкости. Однако по мере увеличения времени УЗО происходит переориентация молекулярных структур и вязкость начинает расти. Кроме того, УЗО в течение 20 с позволяет удерживать частицы во взвешенном состоянии в суспензии, что не даёт частицам осесть на насосно-компрессорных трубах (НКТ) [10].

В работе [13] было проведено изучение влияния микроволновых (МВ) и УЗ волн на свойства тяжелой нефти Юго-западных нефтяных месторождение Ирана. Результаты экспериментов показывают, что в образцах при СВЧ-излучении в течение 5, 10, 15 и 20 мин протекают разные процессы. При МВ в течение 5 и 10 минут вязкость снизилась с 15,836 мПа·с до 12,234 мПа·с и 11,122 мПа·с соответственно. Это происходит из-за увеличения объема с уменьшением загустителя и высокой абсорбционной способностью тяжелых молекул нефти по отношению к молекулярной массе, которая заряжает процесс крекинга.

Тяжелая нефть, использованная в этом исследовании [9], была получена из коллектора Юго-западе Ирана. Насыщенность, ароматические соединения, смолы (ASTM D-4124) и асфальтены (IP-143) в тяжелых нефтях были определены с помощью экспериментов SARA. Начало осаждения асфальтенов в сырой нефти измеряли с помощью вискозиметр с различным процентным содержанием н-гептана [9]. Измеренное начало происходило при смеси сырой нефти и Н-гептана, измеренной с помощью вискозиметра, в 26 об. % н-гептана и 79 об. % сырой нефти. 150 мл сырой нефти и образец, содержащий 26 об. % н-гептана и 79 об. % Сырой нефти, подвергали воздействию волн МВ и УЗ в течение 5, 10, 15 и 20 минут. Причина остановки через 20 минут заключается в том, что по истечении этого периода значения измеряемых компонентов оставались почти постоянными. Образцы подвергались воздействию СВЧ с различной продолжительностью времени при частоте 2450 МГц и мощности 400 Вт. Образец подвергался воздействию ультразвукового излучения с частотой 20 кГц и мощностью 400 Вт в различных временных диапазонах. Облученное

масло охлаждали в течение одного дня при температуре окружающей среды, чтобы дать ему возможность стабилизироваться. После завершения микроволнового и ультразвукового облучения в течение заданного интервала времени они охлаждались и измеряли вязкость при стандартной температуре (25 °С). После перемешивания раствора требуется время, чтобы образовалась оболочка. Четыре капли образцов наблюдаются с помощью микроскопа с кратным увеличением. Оптический поляризационный микроскоп состоит из видеокамеры с высоким разрешением, ПК, монитора изображений с высоким разрешением, а изображения сохраняются в пикселях с высоким разрешением. Растворы излучались СВЧ- и УЗ-излучениями в течение разных интервалов времени [9].

В работе [14] исследовали влияния УЗО на структурно-механические свойства нефтей различного компонентного состава. В результате, при обработке малопарафинистой высокосмолистой нефти (МПВСН) с высоким содержанием асфальтенов в течение 2 мин происходит снижение вязкости в 1,4 раза и температуры застывания на 5°С.

В группе парафинистых высокосмолистых нефтей (ПВСН) с содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов (САК) 19-29 % мас. наблюдается изменение вязкостно-температурных характеристик при рациональном времени обработки:

вязкость снижается в 1,3-3,2 раза,  
температура застывания - на 3-335°С.

Максимальная депрессия вязкости и температуры застывания отмечается для нефтей с соотношением n-алканы: САК=0,13-0,25. Эффективность ультразвукового воздействия снижается при отклонении от значений этого показателя.

## **1.6 Принцип действия и описание аппаратуры акустического воздействия**

Аппаратура акустического воздействия (АВ) на прискважинную зону пласта позволяет создавать в скважине и прискважинной зоне пласта мощное акустическое поле. Аппаратура АВ состоит из наземного ультразвукового генератора, кабеля и скважинного акустического излучателя. Скважинный акустический излучатель опускают на колонне насосно-компрессорных труб на требуемую глубину (рисунок 1.10). Наземный ультразвуковой генератор

питается от сети переменного тока промышленной частоты и служит источником высокочастотной электромагнитной энергии [9].

Питание излучателя осуществляется от наземного ультразвукового генератора по кабелю. Излучатель преобразует энергию электромагнитного поля в акустическую.

*Эффект, получаемый после обработки скважин ультразвуком*

Исследованиями показано [15], что процесс очищения любых поверхностей от загрязнений начинается при удельных мощностях ультразвука от 0,5 Вт на кв.см. Учитывая характеристики оборудования (мощность 5-10 КВт), применявших это оборудование, можно утверждать, что эффективное проникающее воздействие на нефтеносные пропластки призабойной зоны присутствует на расстоянии до 50-60 метров от скважины.

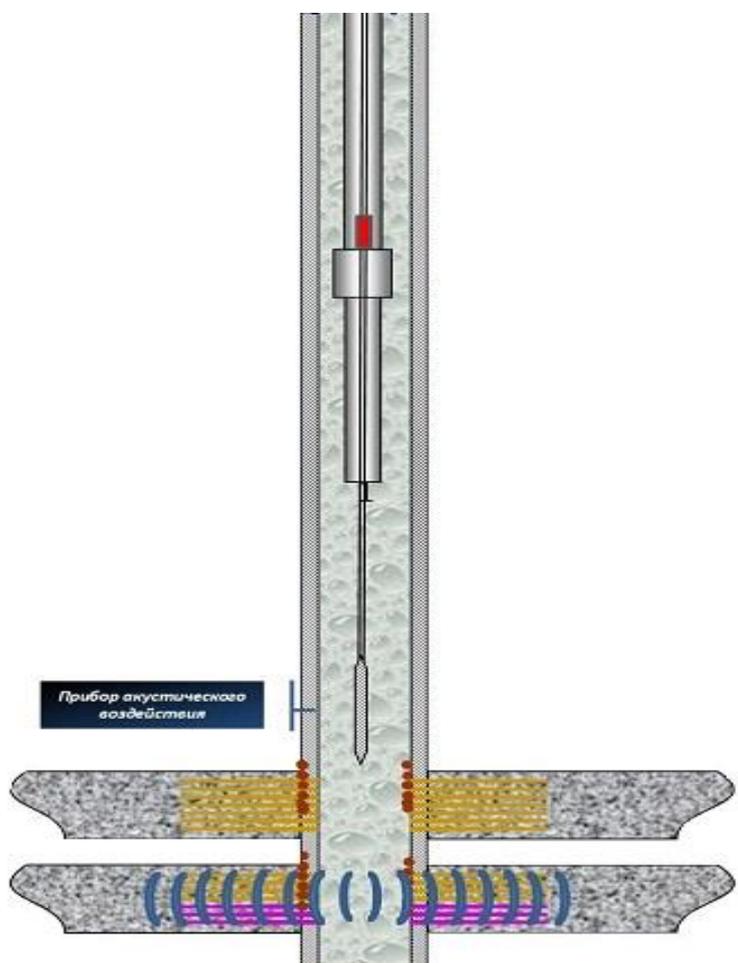


Рисунок 1.10 – Комплект оборудования для УЗ [9]

Воздействие мощного ультразвука способствует росту суммарной проницаемости продуктивного пласта, прекращению роста и разрушению кольтирующих соединений, препятствующих потоку флюида. Процессы в

акустическом поле налагаются друг на друга, упругие волны синхронизируются, отражаются, трансформируются в волны напряжения-растяжения, на фоне роста температур и активного движения газов, создавая условия для очистки пор, развития сети трещин и микротрещин, в прилегающей к скважине породе обрабатываемого пласта [9].

Согласно результатам гидродинамических исследований [15], в скважинах после применения АВ отмечается значительное улучшение состояния одновременно призабойной и удалённой зон пласта по мощности работающих пропластков, проницаемости, гидропроводности и коэффициентам продуктивности. Фактические и прогнозные данные по добыче нефти в течение длительных периодов после АВ полностью подтверждают заключения по гидродинамическим исследованиям о существенном улучшении состояния призабойной зоны пласта и свидетельствуют об эффективности проведённых работ по восстановлению и повышению дебита скважин.

### **1.7 Устройства генерации упругих волн [56]**

Для формирования поля упругих колебаний в нефтяном пласте генераторы колебаний различного рода располагают как на поверхности, так и в скважине. Каждый из известных вариантов имеет свои достоинства и недостатки [15].

К достоинствам наземных генераторов упругих колебаний следует отнести возможность обеспечения больших мощностей, лучшие возможности группирования источников. Мощность источника зависит от приводимой в движение инерционной массы. Развиваемая мощность тем больше, чем больше инерционная масса.

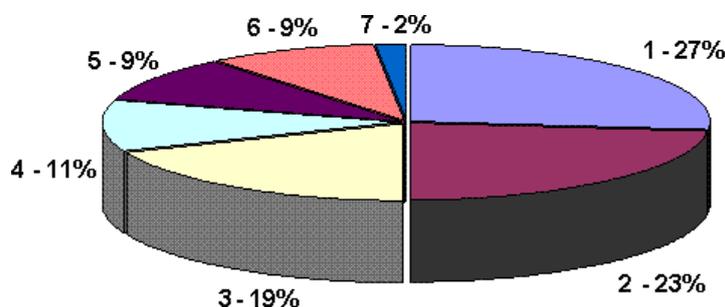
В пространстве, ограниченном стенками скважины, затруднительно обеспечить большую мощность передаваемой в пласт энергии. Группирование источников позволяет в заданных точках пласта увеличить амплитуду волн вследствие интерференции волновых полей, формируемых наземными источниками. Высокая концентрация напряжений при этом приводит к появлению новых трещин и улучшению условий фильтрации углеводородов [2].

Применение скважинных источников позволяет приблизить генератор колебаний к объекту воздействия и исключить потери энергии, обусловленные прохождением волн от источника к нефтяной залежи.

Таким образом, из сказанного следует, что оба способа имеют свои преимущества и недостатки. В данном разделе рассмотрены скважинные устройства генерации колебаний.

Применение для обработки нефтяных пластов колебаний, генерируемых источниками, размещенных на забое скважин, позволяет увеличить радиус охвата, приблизить генератор к объекту воздействия, уменьшить потери энергии, связанные с затуханием волн при их прохождении от источника до нефтяного пласта.

Патентный анализ, проведенный по российским изобретениям в области технических средств и способов воздействия на продуктивные пласты с целью увеличения нефтеотдачи, позволил классифицировать имеющиеся изобретения на 7 групп (рисунок 1.11). В таблице 1.4 приведены основные характеристики предлагаемых устройств и принцип их действия.



1 – электрические, 2 – гидродинамические, 3 – механические, 4 – импульсного действия,

5 – ударно-импульсные, 6 – ударные гидроимпульсные, 7 – кавитационные

Рисунок 1.11 – Распределение излучателей колебаний по типам

Таблица 1.4

Характеристика скважинных излучателей [56]

Классификация устройств	Способ реализации
Электрические	Преобразование электрической энергии (магнитострикционные, пьезоэлектрические и др.)
Гидродинамические	Использование гидродинамических эффектов в потоке (вихревые, тороидальные, диафрагменные и др.)
Механические	Движущиеся элементы конструкции (совмещенные с насосом-качалкой, сирены и др.)
Импульсного действия	Электроразряд в жидкости, пиротехника
Ударные гидроимпульсные	Создание гидроудара при разрушении мембраны
Импульсно-струйные	Создание импульсной струи (клапанные, шариковые пульсаторы, золотниковые и др.)
Кавитационные	Трубка Вентури

Проведенный анализ показывает, что наибольшее внимание (около 70% патентов) уделяется трем основным типам излучателей: электрическим, гидродинамическим и механическим.

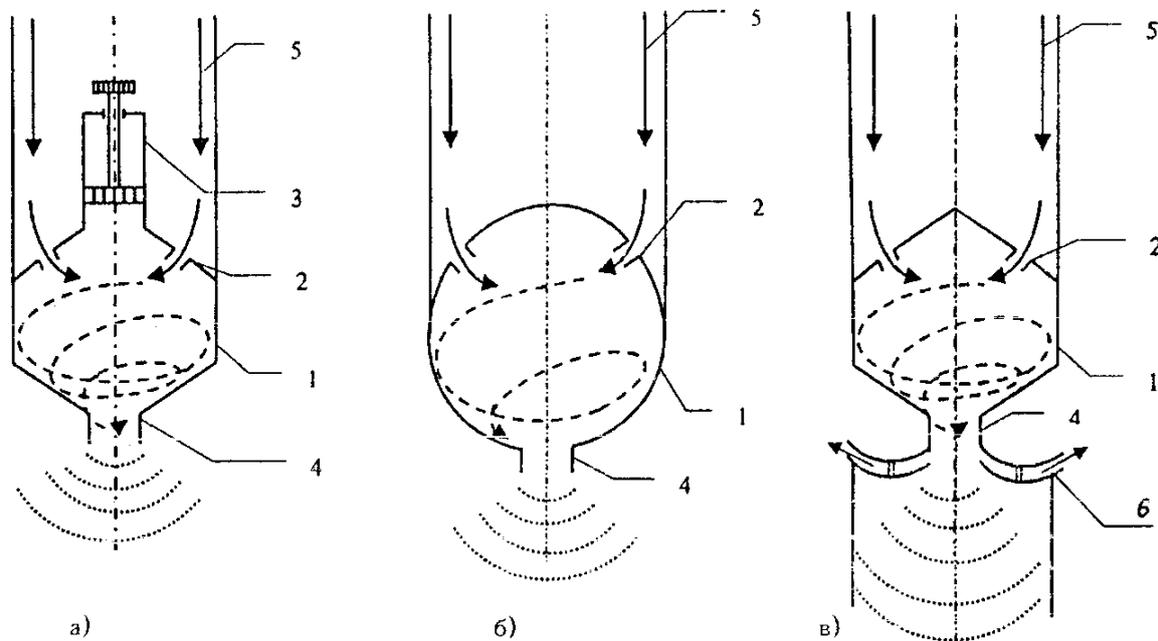
Скважинные вибрационные излучатели, помещенные в ограниченный объем скважины, не обеспечивают большие нагрузки воздействия, но позволяют воздействовать непосредственно на пласт, а не через осадочный чехол горных пород. В А.с. 1203449 СССР описан скважинный вибрационный источник, содержащий размещенные на поверхности насосную установку, пульсатор и исполнительный механизм в виде герметичной деформируемой камеры. Переменный объем жидкости, создаваемый гидрообъемным пульсатором, упругой характеристикой полости камеры трансформируется в пульсирующее давление [2].

Среди многообразия устройств генерации упругих волн предпочтительными для осуществления виброволновых обработок ПЗП являются скважинные гидродинамические генераторы упругих волн (ГДГ), работа которых основана на использовании энергии потока жидкости или газа. Для их функционирования требуется лишь штатное нефтепромысловое оборудование – устьевые насосные агрегаты. Режимные напорно-расходные параметры последних весьма велики, что позволяет при достаточно высоком коэффициенте полезного действия (КПД) гидродинамического генератора создавать на забое скважины большую мощность волнового поля. Кроме того, весьма важно, что скважинная обработка с использованием ГДГ органично совмещается со штатными промысловыми операциями подземного (ПРС) и капитального (КРС) ремонта скважин и с операциями большинства традиционных методов обработок ПЗП и пласта.

К настоящему времени разработаны акустические генераторы с различными активными элементами [2]: вихревые, тороидальные, дисковые, диафрагменные, параметрические, работающие в режиме усиления выходных параметров. Они не имеют движущихся частей и деталей.

В вихревых генераторах (рисунок 1.12) поток рабочего агента 5 по тангенциальным каналам 2 поступает в вихревую камеру 1, где приобретает вращательно-поступательное движение. В вихревом сопле за счет уменьшения диаметра интенсивность вихря возрастает. При этом в вихревой камере образуется зона разрежения [56].

В результате периодического проскока рабочего агента в зону разрежения на выходе сопла генерируются аэрогидродинамические импульсы в виде сжатия и разрежения потока, которые распространяются в виде акустической волны.



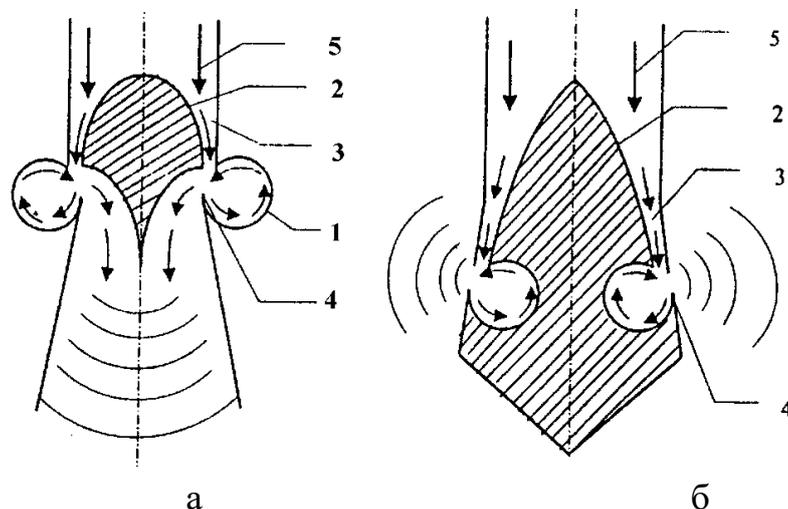
1 – вихревая камера, 2 – тангенциальные входные каналы, 3 – устройство для регулирования объема вихревой камеры, 4 – выходное сопло, 5 – поток рабочего агента

Рисунок 1.12 – Акустические генераторы: а) с цилиндрической вихревой камерой с регулируемым объемом; б) со сферической вихревой камерой; в) с цилиндрической вихревой камерой и направляющей чашкой

Динамические (амплитудно-частотные) характеристики вихревого генератора определяются соотношением геометрических размеров камеры и параметрами рабочего агента. Настройка на резонансный режим генератора производится, например, путем изменения объема вихревой камеры.

В акустических генераторах с тороидальной резонансной камерой (рисунок 1.13) поток рабочего агента под давлением подается в кольцевое сопло 3 и затем поступает (с большой скоростью) в тороидальную резонансную камеру 1. При этом в камере 1 повышается давление, и рабочий агент периодически проскакивает наружу. Кольцевой поток, выходящий из тороидальной резонансной камеры с определенной частотой, периодически прерывает кольцевую струю, истекающую из кольцевого сопла 3. Вследствие этого у активной кольцевой кромки 4 тороидальной камеры генерируются

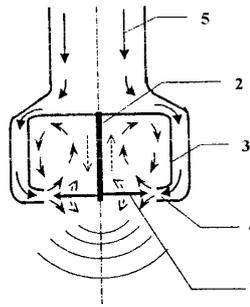
периодические аэрогидродинамические импульсы в виде сжатия и разряжения потока рабочего агента. Динамические характеристики генератора определяются геометрическими размерами тороидальной резонансной камеры и кольцевого сопла, а также параметрами и характеристиками рабочего агента [56].



1 – тороидальная резонансная камера, 2 – обтекатель, 3 – кольцевое входное сопло, 4 – активная кольцевая кромка тороидальной камеры, 5 – поток рабочего агента

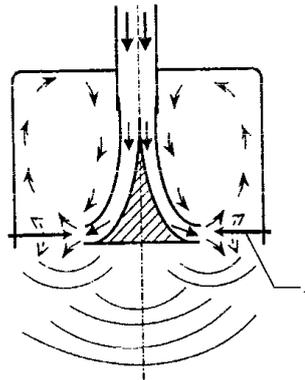
Рисунок 1.13 – Тороидальные акустические генераторы: а) продольного излучения; б) поперечного излучения

В акустических генераторах дискового или диафрагменного типа (рисунках 1.14, 1.15) рабочий агент подается в радиальное кольцевое сопло 4. Далее поток с большой скоростью натекает на лезвие дискового 1 или диафрагменного 6 резонатора и возбуждает в них интенсивные изгибные автоколебания, которые генерируют акустические волны [2,16]. Излучение волновой энергии осуществляется в направлении, перпендикулярном к плоскости диска или диафрагмы. Изгибные колебания приводят к пульсации давления рабочего агента над диском или диафрагмой в тороидальной резонансной камере 3 с частотой колебаний резонаторов 1 и 6. Это, в свою очередь, приводит к продольным колебаниям стержня 2 (на его собственной частоте), что усиливает волновую энергию потока жидкости.



1 – диск-резонатор, 2 – стержень-резонатор, 3 – тороидальная резонансная камера, 4 – радиальное кольцевое сопло, 5 – поток рабочего агента

Рисунок 1.14 – Акустический дисковый генератор

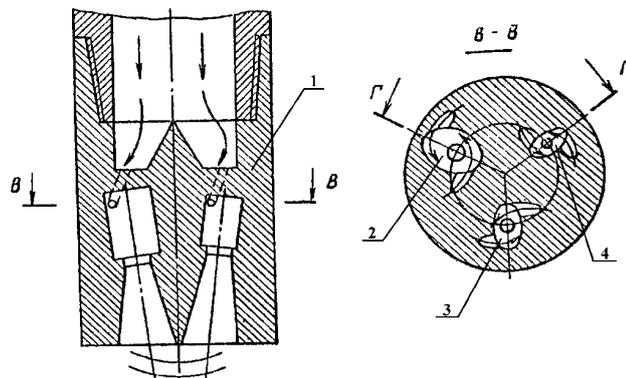


1 – диафрагменный резонатор

Рисунок 1.15 – Акустический диафрагменный генератор

Параметрические акустические генераторы обеспечивают повышение эффективности за счет концентрации энергии при генерации акустических колебаний в нелинейном режиме работы (рисунок 1.16).

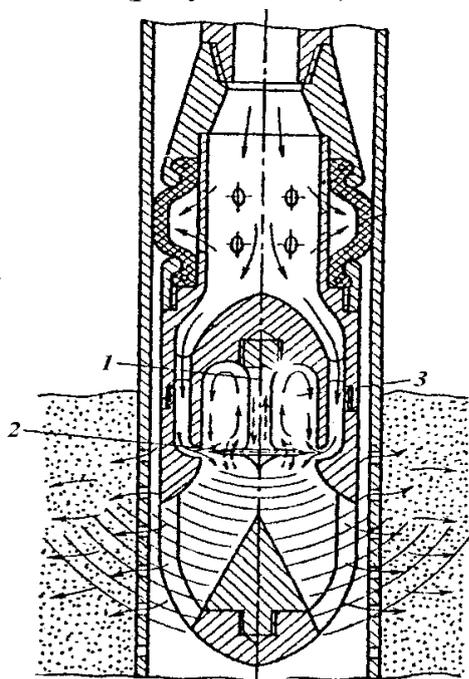
В более сложном варианте подобный генератор содержит несколько резонаторов (дисковый, стержневой, тороидальный).



1 – корпус, 2 – основная вихревая камера, 3, 4 – дополнительные вихревые камеры

Рисунок 1.16 – Параметрический акустический генератор

В совокупности резонаторы генерируют акустические колебания давления комбинированной частоты с большей амплитудой, чем амплитуда любого из складываемых колебаний давления (рисунок 1.17).



1 – стержневой резонатор, 2 – дисковый резонатор, 3 – резонансная камера

Рисунок 1.17 – Параметрический излучатель

Таким образом, можно сформулировать следующее:

Для поддержания на современном этапе темпов добычи и увеличения коэффициента нефтеотдачи необходимы принципиально новые методы и средства воздействия на продуктивные пласты.

Перспективным представляется метод акустического воздействия:

- воздействие на пласт полем упругих волн приводит к увеличению нефтеотдачи и снижению обводненности извлекаемой продукции;
- для его реализации нет необходимости в изменении технологической схемы добычи углеводородного сырья.

В качестве излучателя упругих волн, наиболее перспективно применение таких конструктивных схем, которые позволяют воздействовать на продуктивный пласт в процессе его разработки и использовать для возбуждения колебаний энергию потока жидкости, нагнетаемой в пласт [56].

## 1.8 Основные способы осуществления волнового воздействия на

### пласт

С поверхности при помощи вибросейсмических источников.

Институтом Физики Земли Академии наук предложен способ вибросейсмического воздействия на обводненные нефтяные месторождения [17, 18]. В качестве вибросейсмического источника используется поверхностный электрогидравлический вибратор СВ-20/60 с максимальным виброусилием 20 тс. Вибросейсмическое воздействие осуществляется на доминантной частоте пласта, найденной в ходе предварительных испытаний. В частности, обнаружено, что доминантная частота коллектора гранулярного типа составляет 12 Гц. Применение этого способа на обводненном нефтяном месторождении Абузы позволило повысить содержание нефти в скважинной жидкости в 2 раза, что объясняется восстановлением подвижности зачехленной нефти в смеси пластовых флюидов.

Во ВНИИГеоинформсистем с целью аккумуляции нефти в пласте и последующего его извлечения традиционными методами сейсмоакустическое воздействие на обводненные нефтяные пласты производится с помощью вибросейсмических платформ [17].

С поверхности при помощи пневмоимпульсных генераторов ГИДП. Способ, предложенный ВНИПИВзрывгеофизикой [17], предназначен для обработки прискважинной зоны пласта и фильтров скважин различного назначения путем выхлопа сжатого газа или продуктов горения взрывчатых веществ в скважине, заполненной жидкостью. Выхлоп сжатого газа проводят на устье закрытой скважины, возникающее при этом избыточное давление на скважинную жидкость, поддерживают до прекращения понижения давления на устье скважины. Избыточное давление на устье сбрасывают путем его резкого открытия.

Воздействие ударами по наковальне, установленной в скважине.

Данный способ волнового воздействия на залежь предложен сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского нефтегазового института. Суть его состоит в том, что в эксплуатационную скважину на уровне нефтяного пласта устанавливают наковальню, по которой наносят удары. В качестве груза используют заполненные утяжеленной жидкостью буровые трубы. Сила удара груза о наковальню обеспечивает мощные упругие колебания в пласте [17].

Импульсное воздействие испытателем пластов. Производственным объединением «Татнефтегеофизика» предложено осуществлять импульсное воздействие на призабойную зону пласта испытателем пластов, что способствует

разрушению и выносу засоряющих частиц, и восстановлению коллекторских свойств призабойной части пласта. Эффективность воздействия в добывающих скважинах составляет 66%, в нагнетательных - 80 %; продолжительность эффекта - 6-18 месяцев. Прирост добычи нефти на одну операцию - 500 т, закачиваемой воды - 11000 м.

Вибровоздействие посредством депрессий. Институтом БашНИПИНефть (Уфа) предложен способ воздействия на призабойную зону пласта [17], включающий спуск в скважину колонны НКТ, сообщаемой с пластом, закачку в скважину газа при давлении, соответствующем пластовому, и создание многократных депрессий на пласт с убывающей частотой (начальная частота составляет порядка 0,15 Гц) до выравнивания забойного и пластового давлений. Продуктивность скважины в результате воздействия на пласт циклической депрессией возросла на 68%.

Обработка забоев скважин с помощью гидравлических вибраторов. В РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина под руководством С.М. Гадиева разработаны вибраторы золотникового типа ГВЗ-108, использующие энергию потока рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости могут быть использованы вода, нефть, ПАВ; расход ее составляет 15-20 дм<sup>3</sup>/с. Вибратор спускается в скважину в зону обработки. Частота ударных импульсов - 100 - 200 Гц; давление на выходе - 10 МПа; длительность обработки - 5-8 час. Вибраторы ГВЗ-108 позволяют получить наибольшую амплитуду давления по сравнению с гидродинамическими излучателями волн давления типа ГК, ПВ-54, ГДИ-1, ГАП. Как отмечают сам автор [18], недостатком вибраторов золотникового типа является малая глубина воздействия на пласт вследствие быстрого затухания в поровом пространстве колебаний давления.

В РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина разработан также вибратор клапанный ударный КУВ-100 [17, 18], предназначенный для улучшения фильтрационных характеристик пласта и увеличения нефтеотдачи. Вибратор КУВ-100 спускается в скважину в зону обработки. В качестве рабочей жидкости используются вода, нефть, ПАВ. Частота ударных импульсов не более 20 Гц; амплитуда импульса давления на выходе при расходе рабочей жидкости 20 дм<sup>3</sup>/с не менее 25 МПа.

Акустическое воздействие на призабойную зону. СибНИИНП, ВНИИГеоинформсистем и УПИ им. С.М. Кирова разработана и испытана аппаратура акустического воздействия на призабойную зону скважины [17]. Создаваемое акустическое поле имеет частоту от 7 до 20 кГц и интенсивность от

300 до 10000 Вт/м в зависимости от типа скважинного излучателя. Как отмечают авторы разработки, технологическая эффективность воздействия определяется возникновением дополнительного градиента давления в пористой среде, увеличением температуропроводности пород, расформированием зоны пониженной проницаемости, вызванной отложением парафинов и проникновением фильтрата промывочных растворов, образованием дополнительных трещин в призабойной зоне, а также изменением реологических свойств нефти в пластовых условиях (снижение вязкости, увеличение фазовой проницаемости и др.).

Аппаратура испытана на месторождениях Западной Сибири, было проведено 20 обработок призабойной зоны скважин. Коэффициент успешности по обработанным скважинам составил 69%.

Воздействие скважинным шаровым генератором импульсов давления. Способ и устройство разработаны ГП «Геосинтез» совместно с ПГО «Центргеология» [17]. Основным элементом генератора является клапанное устройство, состоящее из седла с каналом и продавливаемым через канал под определенным давлением шаровым элементом из упругого материала. Генератор монтируется на колонне труб НКТ, размещается в зоне продуктивного пласта и предназначен для интенсификации процессов скважинной гидродобычи, интенсификации притоков в скважинах на воду и нефть путем возбуждения в зоне притока низкочастотных импульсов давления. В качестве рабочего агента в зависимости от целевого назначения скважин и требований экологии применяется вода, газы (воздух, двуокись углерода, азот и др.), аэрированная вода, растворы химических реагентов, поверхностно-активных веществ. Шаровые генераторы рассчитаны на длительное бесподъемное применение в эксплуатационных скважинах. Их привод в действие осуществляется по мере необходимости со спуском в скважину шаровых элементов, посадкой и продавливанием их через отверстие седла.

9. Способ, совмещающий наземное и скважинное воздействие на пласт. Конструктивно совмещенный вариант представляет собой мобильный импульсный источник большой мощности, расположенный на поверхности земли, и волновод, по которому к пласту подводится энергия с минимальными потерями [17].

В качестве источника возбуждения колебаний используется станок канатно-ударного бурения УГБ-ЗУК [17], источник геофизического типа СВ-10/100, либо электромагнитный молот МЭМ-3000 [18].

Для повышения эффективности наземных источников колебаний применяются промежуточные согласующие среды между излучающим элементом и грунтом, устройства статического нагружения грунта в районе работы источника, а также специальные устройства нагружения инерционной массы виброисточника весом транспортного средства. Для наземных источников разработана система управления частотой вибрации и амплитудой задающего сигнала.

С помощью разработанных технических средств были успешно проведены опытно-промысловые работы по вибросейсмическому воздействию на обводненные нефтяные пласты месторождений Чангыр-Таш (ПО «Киргизнефть»), Жирновское (Жирновское НГДУ) и Павловское (НГДУ «Чернушка-нефть») [17]. На всех опытных участках в результате вибросейсмического воздействия произошло снижение обводненности продукции в среднем на 13% и увеличение дебита нефти в среднем на 50%. Эффект наблюдался на протяжении нескольких месяцев. Повторное осуществление вибросейсмического воздействия вызвало увеличение дебита в контролируемых скважинах.

Следует отметить, что описанные выше технические средства и технологии возбуждения упругих колебаний в пласте — это далеко не полный перечень имеющихся у нас в стране и за рубежом разработок. Каждый из предлагаемых способов возбуждения упругих колебаний имеет свои преимущества и недостатки.

### **Литература к главе 1**

1. Muhammed M.A. Antenna array design for enhanced oil recovery under oil reservoir constraints with experimental validation / M.A. Muhammed // Proceedings of the ICE – Energy. – 2014. – No 66. – P. 868–880.

2. Алфаяд А.Г.Х. Возможности применение волновых методов для решения ряда проблем в добыче нефти и газа / А.Г.Х. Алфаяд // Фундаментальные научно-практические исследования: актуальные тенденции и инновации. Сборник научных трудов по материалам XXV Международной научно-практической конференции (г.-к. Анапа, 31 декабря 2021 г.). – Анапа: Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2021. – 104 с.

3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязнённых вод и грунтов: дис. ... докт. техн. наук / М.С. Муллакаев. – М., 2011. – 391 с.

4. Daniel K. Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test / K. Daniel, P. Pavel, F. Václav et al. // *Coatings*. – 2021. – No 11(10). – P. 1–24. doi:10.3390/coatings11101250.
5. Алфаяд А.Г.Х. Современные методы повышения нефтеотдачи пласта / А.Г.Х. Алфаяд // *Фундаментальные научно-практические исследования: актуальные тенденции и инновации. Сборник научных трудов по материалам XXV Международной научно-практической конференции (г.к. Анапа, 31 декабря 2021 г.)*. – Анапа: Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2021. – 104 с.
6. Барышников А.А. Исследование и разработка технологии увеличения нефтеотдачи за счет вытеснения с применением электромагнитного поля: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.А. Барышников. – Великий Новгород, 2014. – 200 с.
7. Jaber T. Using ultrasonic as a new approach for elimination of inorganic scales (NaCl): an experimental study / T. Jaber, N. Hassan, S. Yaser et al. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – No 8. – P. 553–564. DOI:10.1007/s13202-017-0369-4.
8. Pu, C. Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment / C. Pu // *Petroleum Exploration and Development*. – 2011. – No 38(2). – P. 243–248.
9. Алфаяд А.Г.Х. Анализ волнового воздействия на изменение реологических характеристик тяжелой нефти / А.Г.Х. Алфаяд, Р.А. Кемалов // *Технологии нефти и газа*. – 2022. – № 2(139). – С. 55–58.
10. Сюняев З.И. Нефтяные дисперсные системы / З.И. Сюняев, Р.З. Сафиева. – М.: Химия, 1990. – 224 с.
11. Mullins O.C. Asphaltene, heavy oils and petroleomics / O.C. Mullins, E.Y. Sheu, A. Hammami et al. // Springer Science+Business Media, LLC. – 2007. – P. 460–461. DOI: 10.1007/0-387-68903-6.
12. Shedid S.A. Influences of ultrasonic radiation on asphaltene behavior with and without solvent effects / S.A. Shedid, S.R. Attallah // *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*. – Society of Petroleum Engineers. – 2004. DOI: 10.2118/86473-MS.
13. Jaber T. Analysis of the asphaltene properties of heavy crude oil under ultrasonic and microwave irradiation / T. Jaber, S. Ali, N. Hassan // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2018. – No 129. – P. 171–180. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.11.015.

14. Волкова, Г.И. Применение ультразвуковой обработки для снижения вязкостно-температурных характеристик нефти / Г.И. Волкова // Деловой журнал *neftegaz.ru*. – 2015. – № 3(39). – С. 20–23.
15. Бажалук Я.М. Увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, Я.Д. Клымышин и др. // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 185–198.
16. Марфин Е.А., Овчинников, М.Н. Упругие волны в насыщенных пористых средах: учеб. пособие / Е.А. Марфин, М.Н. Овчинников. – Казань: Казанский университет, 2012. – 28 с.
17. Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа : сборник трудов IX международной конференции (27 сентября – 1 октября 2021 г.). – Томск : Издательство ИОА СО РАН, 2021. – 104 с. – 1 CD-ROM. – Систем. требования: Intel 1,3 ГГц и выше; дисковод CDRом; мышь; ОС Microsoft Windows; Acrobat Reader 4.0 и выше. – Загл. с экрана.
18. Вольницкая Е.П. Гидродинамические методы анализа фильтрационных полей и свойств коллекторов сложного строения при импульсно-волновых воздействиях в скважине: дис. ... д.т.н. / Е.П. Вольницкая. – Москва, 2005. – 256 с.
19. Алфаяд А.Г.Х. Анализ методов волнового воздействия на призабойную зону пласта / А.Г.Х. Алфаяд, Д.З. Валиев // Цифровая наука. – 2021. – № 3. – С. 110–122.
20. Ghamartale A. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure / A. Ghamartale, M. Escrochi, M. Riazi et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – No 51. – P. 305–314.
21. Dehshibi R.R. Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model / R.R. Dehshibi, M. Ali, R. Masoud et al. // *Fuel*. – 2019. – No 239. – P. 709–716.
22. Hamidi H. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results / H. Hamidi, A.S. Haddad, E.W. Otumudia, R. et al. // *Ultrasonics*. – 2021. – No 110(106288). – P. 1–13.
23. Wang Z. Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery / Z. Wang, Y. Xu, Y. Gu // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2015. – No 27. – P. 171–177.

24. Hamidi H. A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs / H. Hamidi, R. Rafati, R. Junin et al. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2012. – No 2(1). – P. 29–36.
25. Mullakaev M.S. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions / M.S. Mullakaev, G.I. Volkova, O.M. Gradvov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – No 49(3). – P. 287–296.
26. Naderi K. Visual analysis of immiscible displacement processes in porous media under ultrasound effect / K. Naderi, T. Babadagli // *Physical Review E*. – 2011. – No 83(5 pt 2). – P. 056323-1–056323-14.

## **2 ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК МЕТОД РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЕ**

В этой главе рассматривается применение волнового воздействия с целью повышения нефтеотдачи пласта. Мощная ультразвуковая технология, становясь все более заметной в нефтяной промышленности, привлекает широкое внимание. Физические и химические эффекты периодических колебаний и взрывов акустических кавитационных пузырьков могут быть применены для выполнения разнообразных функций. В этой главе мы рассмотрим механизмы и последствия акустической кавитации. Кроме того, мы подробно обсудим области применения мощного ультразвука в нефтяной промышленности, включая увеличение нефтеотдачи, извлечение нефтеносного песка, деэмульсацию, снижение вязкости, очистку нефтесодержащих сточных вод и разработку нефтешламов.

Также рассмотрим вопросы, связанные с промышленным внедрением мощного ультразвука, включая ключевые проблемы и механизмы их решения, текущие области применения и перспективы его развития. Особое внимание будет уделено акустическим параметрам, таким как частота, акустическая интенсивность и время обработки, их влиянию на эффективность обработки.

### **2.1 Введение**

На средних и поздних стадиях добычи значительное количество сырой нефти остается в пластах и не может быть вытеснено естественным путем или заводнением [1,2]. Это масло обладает не только высокой вязкостью, но и высокой гигроскопичностью породы, показывая плохую текучесть. Для достижения высокой нефтедобычи разработка экологически чистых технологий повышения нефтеотдачи является практичной и сложной задачей. Помимо ускорения эксплуатации традиционных источников энергии, многие страны постепенно обращают внимание на использование нетрадиционных источников энергии для удовлетворения растущего потребления энергии. Среди них нефтеносный песок привлекает большой интерес нефтяной промышленности из-за его больших запасов, эффективного распределения и легкой добычи [3]. Однако быстрая добыча нефтеносного песка создает множество проблем для последующей добычи, включая чрезмерное использование поверхностно-активных веществ и загрязнение воды. Существенным недостатком также

является высокая энергозатратность при транспортировке и перегонке сырой нефти. Чтобы свести к минимуму потери энергии и риски безопасности, необходимы соответствующие технологии для обезвоживания сырой нефти и снижения ее вязкости [4, 5]. Кроме того, при добыче, хранении, транспортировке и переработке нефти образуется большое количество отходов, содержащих высокие концентрации нефтяных углеводородов (КНУ). Высокотоксичные отходы не только наносят непоправимый ущерб окружающей среде, но и представляют угрозу для здоровья человека, и их сброс без обработки не допускается по закону. Увеличение использования ископаемого топлива приводит к увеличению образования нефтесодержащих отходов, что увеличивает нагрузку на очистные сооружения [6].

Ультразвук имеет большие перспективы как для разведки, так и для добычи нефти в связи с его чистотой, низкой стоимостью и высокой эффективностью [7]. В частности, мощный ультразвук (20–100 кГц) не только хорошо проникает в масло/водные среды [8], но также может генерировать и передавать высокую удельную плотность энергии (10–1000 Вт·см<sup>-2</sup>) [9]. Когда кавитационный пузырь взрывается, возникает высокая температура около 5000 К и высокое давление около 2000 атмосфер, сопровождаемые ударными волнами и микроструями. Такие эффекты кавитации могут разорвать длинные цепочки молекул масла, тем самым улучшив качество сырой нефти. Кроме того, ультразвуковой метод отвечает требованиям устойчивого развития, поскольку он работает в умеренных условиях и не производит летучих органических химических веществ (ОХВ). Однако сложные физико-химические характеристики акустической кавитации затрудняют понимание механизма мощного ультразвука для различных приложений, что необходимо для оптимизации рабочих параметров и повышения эффективности. Тем не менее, лишь немногие обзоры всесторонне обсуждают механизм и применение акустической кавитации в нефтяной промышленности.

В этом главе представлены физические и химические эффекты акустической кавитации с точки зрения динамики пузырьков. Кроме того, подробно обсуждаются применения мощного ультразвука в нефтяной промышленности, включая повышение нефтеотдачи, извлечение нефтеносного песка, деэмульсацию, снижение вязкости, очистку нефтесодержащих сточных вод и нефтешламов.

## 2.2. Акустические характеристики кавитации

### 2.2.1 Акустическая кавитация и кавитационный порог

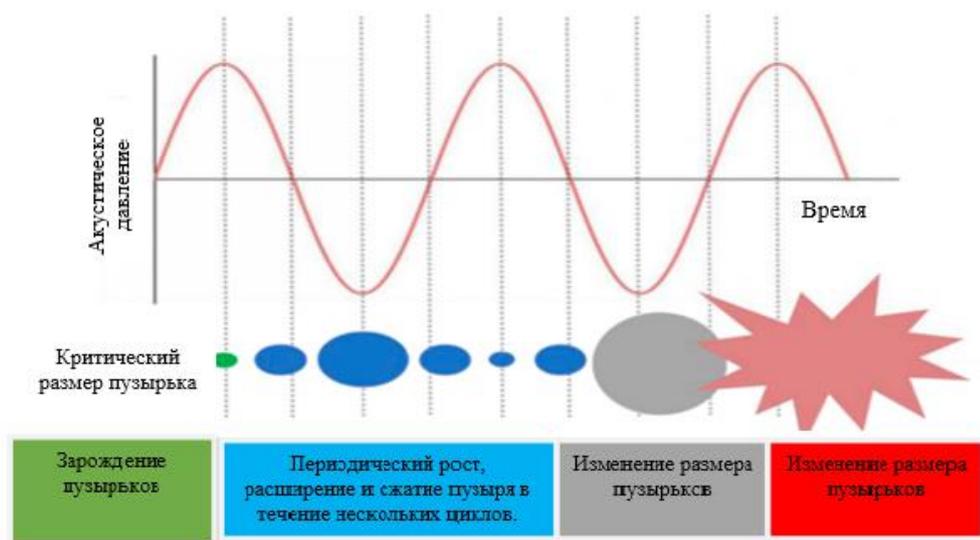
Ультразвук представляет собой механическую волну с колебаниями давления, которая может проходить через газообразные, жидкие и твердые среды [9]. В частности, мощный ультразвук (20–100 кГц) может передавать в среду высокую удельную плотность энергии и вызывать интенсивную акустическую кавитацию, которая затем приводит к высоким температурам и давлениям, а также к механическим воздействиям (ударные волны, микроструи и сдвиговые силы). Эти эффекты связаны с эволюцией кавитационных пузырьков. Под действием ультразвука среда подвергается циклу расширения и сжатия под давлением. Когда отрицательное давление преодолевает силу сцепления между частицами жидкости, в среде появляются кавитационные пузырьки в виде зародышей. Кавитационные пузырьки образуются тремя способами: а) одиночные пузырьки; б) цепочки пузырьков; в) маленькие пузырьки, которые отделяются от существующих пузырьков. Чтобы вызвать акустическую кавитацию, интенсивность звука должна достичь определенного значения, известного как порог кавитации. Увеличение частоты может привести к более высокому порогу акустической кавитации, указывая на то, что акустическая кавитация имеет тенденцию возникать на низких частотах. Порог кавитации сильно зависит от свойств среды, таких как вязкость, межфазное натяжение и давление пара [10]. Кроме того, порог кавитации чувствителен к растворенному газу в среде. Микропузырьки в жидкости способствуют зарождению кавитационных пузырьков, что значительно снижает порог кавитации.

### 2.2.2 Динамика пузыря

Физические и химические эффекты акустической кавитации определяются динамикой пузырьков. Как показано в 2.1, эволюция кавитационного пузыря в колеблющемся поле давления имеет две стадии: расширение и схлопывание. Когда пузырь достигает нестабильных размеров, он взрывается и вызывает ряд физических и химических явлений. Радиальная динамика пузырька описывается уравнением Келлера-Миксиса [11] :

$$(1 - \dot{M})R\ddot{R} + \frac{3}{2}\left(1 - \frac{\dot{M}}{3}\right)\dot{R}^2 = \frac{1 + \dot{M}}{\rho_L} + \frac{R}{\rho_L C} \frac{d}{dt} [P_B - P_\infty - P_\omega] \quad (2.1)$$

где  $M$  — число Маха, эквивалентное  $R/c$ ;  $R$  — радиус пузырька;  $c$  — скорость звука;  $\rho_L$  — плотность жидкости;  $P_B$  — давление в пузырьке;  $P_\infty$  — статическое гидравлическое давление;  $P_w$  — амплитуда акустического давления.



**Рисунок 2.1 – Эволюция кавитационного пузырька при колебаниях звукового давления**

Во время фазы отрицательного давления зародышевый пузырек расширяется и достигает максимального радиуса  $R_{\max}$  в конце расширения. Температура внутри расширяющегося пузыря остается постоянной при отсутствии химических реакций. Давление внутри пузырька уменьшается и достигает минимума в конце расширения. Температура  $T$  и давление  $P_B$  внутри пузырька при расширении определяются выражением [12]:

$$T = T_\infty = \text{cte} \quad (2.2)$$

$$P_B = P_v + \left( P_0 + \frac{2\alpha}{R_0} - P_v \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (2.3)$$

где  $T$  — температура в пузырьке;  $T_\infty$  — температура жидкости;  $P_v$  — давление паров жидкости;  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $R_0$  — окружающий радиус пузырька.

Во время фазы положительного давления кавитационные пузырьки быстро схлопываются, что сопровождается рядом физических и химических явлений. Этот процесс происходит в адиабатическом состоянии, так как чрезвычайно короткое время схлопывания тормозит теплообмен внутри и снаружи пузырька. Температура и давление внутри пузыря увеличиваются по

мере уменьшения размера пузыря [13]. Когда радиус пузырька достигает минимального радиуса  $R_{\min}$ , внутри сжатого пузыря может быть достигнута температура около 5000 К и давление около 2000 атмосфер. Такая высокая температура вызывает сложную серию элементарных реакций, в результате которых образуются различные окислители. В заключение, высокая температура, высокое давление и окисление вызывают сонохимические реакции. Температура  $T$  и давление  $P_B$  внутри пузырька при схлопывании определяются выражением [12]:

$$T = T_{\infty} = \left( \frac{R_{\max}}{R} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (2.4)$$

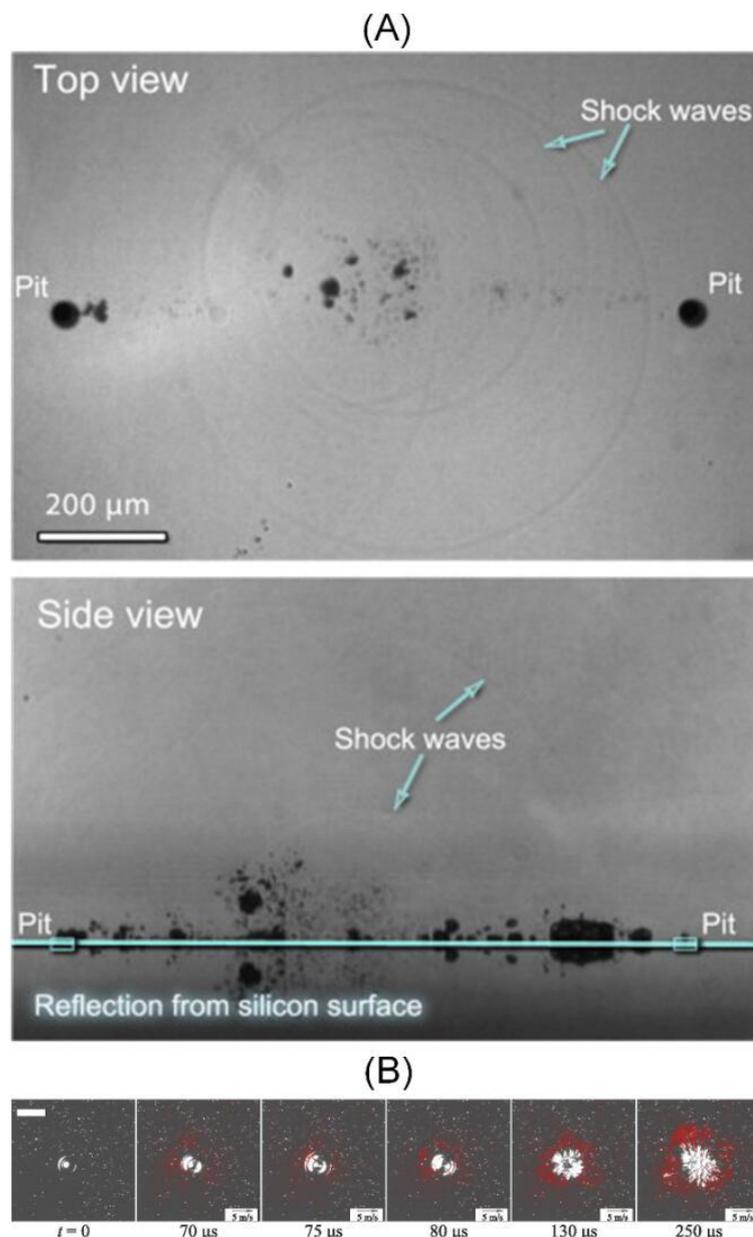
$$P_B = \left( P_V + \left( P_0 + \frac{2\alpha}{R_0} - P_V \right) \left( \frac{R_0}{R_{\max}} \right)^3 \right) \left( \frac{R_0}{R_{\max}} \right)^{3\gamma} \quad (2.5)$$

где  $R_{\max}$  — максимальный радиус пузырька;  $\gamma$  — коэффициент адиабаты.

Радиус пузырька  $R_0$  при нулевом мгновенном акустическом давлении представляет собой окружающий радиус, также известный как равновесный радиус. Равновесный радиус  $R_0$  отражает средний радиус пузырьков на данной частоте. При схлопывании радиус кавитационного пузыря уменьшается от максимального до минимального. Степень сжатия  $R_{\max} / R_{\min}$  определена как ключевой параметр, влияющий на интенсивность кавитации [11]. Как максимальная температура, так и давление, достигаемые внутри пузыря в конце схлопывания, увеличиваются с увеличением степени сжатия. Более того, максимальная температура увеличивается линейно, а максимальное давление увеличивается экспоненциально с увеличением степени сжатия. Степень сжатия также используется, чтобы отличить активные пузырьки от неактивных [14]. Как уменьшение частоты, так и увеличение интенсивности звука могут эффективно увеличить степень сжатия, усиливая акустическую кавитацию [10].

### **2.2.3. Механические эффекты акустической кавитации: ударные волны и микроструи**

Как показано в Рис. 2.2, периодические колебания и схлопывание кавитационного пузыря вызывают механические эффекты, такие как ударные волны и микроструи.



**Рисунок 2.2 – Механические эффекты, вызванные кавитационным пузырем: (А) ударные волны и (Б) микроструи [1].**

В случае колеблющегося звукового давления расширение и схлопывание пузыря вызываются движущейся стенкой пузыря. Направление скорости стенки пузырька мгновенно меняется с внутреннего на внешнее в начале расширения. Этот быстрый переход заставляет стенку пузыря запускать непрерывные ударные волны в окружающую жидкость [15]. Ударные волны, создаваемые кавитационным пузырем, показаны на рис. 2(А) [16]. Когда кавитационный пузырь достигает неустойчивого состояния, он взрывается и генерирует микроструи. Кавитационная струя может проникать сквозь стенку пузыря, что считается характерным острым выдавливанием. Микроструи,

возбуждаемые схлопывающимся пузырем, и поле скоростей показаны на рис. 2(Б) [17]. При воздействии ударных волн и микроструй на границу раздела фаз сдвиговые силы вызывают отрыв и разрушение.

#### 2.2.4 Эффекты сонохимии: свободные радикалы кислорода

Во время схлопывания пузыря высокая температура вызывает разложение молекул воды и кислорода внутри пузыря. В реакционной системе образуются различные оксиды, такие как  $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\cdot\text{H}$ ,  $\cdot\text{O}$  [18]. Среди них гидроксильные радикалы могут реагировать с органикой без разбора из-за их высокой окислительной способности (потенциал окисления до 2,80 эВ) [19]. В течение одного цикла общее количество свободных радикалов увеличивается при схлопывании пузырька и остается постоянным при его расширении [12]. После взрыва пузыря свободные радикалы диффундируют в окружающую среду и окисляют органические соединения. Основные химические реакции, приводящие к образованию оксидов в кавитационном пузырьке, представлены следующим образом:



### 2.3 Влияние акустических параметров и свойств среды на акустическую кавитацию

2.2.1. Акустические параметры частота, интенсивность звука, время обработки и тип поля являются основными параметрами, определяющими акустическую кавитацию.

(1) Увеличение частоты увеличивает порог кавитации, препятствуя зарождению пузырьков [18]. Кроме того, количество пузырьков увеличивается, а средний размер пузырьков уменьшается.

(2) Увеличение интенсивности звука приводит к увеличению амплитуды акустического давления, вызывая более сильные колебания пузырьков [19].

(3) Температура жидкости увеличивается со временем обработки, снижая порог кавитации [20].

(4) Акустическая кавитация более выражена в поле стоячей волны, чем в поле бегущей волны [10].

2.2.2. Средние свойства к свойствам среды, определяющим акустическую кавитацию, относятся вязкость, межфазное натяжение, давление насыщенного пара, растворенный газ и пористость твердого тела.

(1) Высокая вязкость способствует отрицательному давлению в фазе расширения, тем самым повышая порог кавитации [10].

(2) Увеличение межфазного натяжения снижает скорость зарождения пузырька, но увеличивает интенсивность взрыва пузыря [21].

(3) Увеличение давления насыщенного пара способствует акустической кавитации, поскольку количество пара внутри пузыря увеличивается [10].

(4) Зарождению пузырьков способствует газ, растворенный в среде, что приводит к снижению порога кавитации [22].

(5) Источником кавитации может быть газ, захваченный в зазорах и отверстиях твердого тела [22].

## **2.4 Влияние ультразвука на повышение нефтеотдачи**

В данном разделе будут рассмотрены лабораторные и математические исследования влияния ультразвука на добычу нефти, повреждения пласта, поток жидкости и вязкость. После этого были представлены полевые исследования ультразвуковых процессов повышения нефтеотдачи. В конце, будут обобщены технологии, сравнимые с ультразвуком, которые, кажется, имеют хорошие перспективы для улучшения нефтеотдачи.

Многочисленные лабораторные исследования показали способность ультразвука мобилизовать остаточную нефть, увеличивать проницаемость коллектора и улучшать качество нефти восстановление.

В работах [23, 24] исследовали влияние УЗ для увеличения проницаемости и увеличения нефтеотдачи. Они пришли к выводу, что мощность ультразвука была наиболее важным фактором для добычи нефти. Это согласуется с результатами экспериментов по влиянию частоты волн и выходной мощности на добычу нефти в процессе заводнения, стимулированного ультразвуком [23], где серия экспериментов по заводнению с ультразвуковой стимуляцией была проведена на обычной песчаной набивке, насыщенной вазелином и керосином в качестве нефтяной фазы. Частоты (25, 40 и 65 кГц) и выходная мощность (50–500 Вт) волн варьировались в каждом эксперименте и изучалось влияние на нефтеотдачу. Результаты определили, что выходная мощность является наиболее значимым фактором, влияющим на нефтеотдачу. Увеличение выходной мощности (интенсивности) волн увеличивает нефтеотдачу, а увеличение частоты волн ускоряет добычу нефти; тем не менее, конечная нефтеотдача была одинаковой для волн разной частоты. Например, применение ультразвука увеличивало извлечение нефти вазелина на 10%, 14% и 17% для

выходных мощностей 100, 200 и 400 Вт соответственно. С другой стороны, для выходной мощности 100 Вт при времени обработки 200 мин восстановление волн 25 кГц составило 51% PV, тогда как оно составило 53% и 57% для волн с частотой 40 и 65 кГц, соответственно [23].

Основываясь на вышеупомянутых исследованиях, имеет смысл сказать, что развитие ультразвуковых технологий не обязательно должно заменять существующий набор методов для улучшения восстановления, вместо этого они могут дополнять их для лучшего восстановления.

В работе [25] изучали влияние ультразвука на снижение вязкости сверхтяжелой нефти. Начальная вязкость сверхтяжелой нефти составляла 1250 МПа·с. Диапазон частот волн от 18 кГц до 25 кГц и мощности выходы 100 Вт - 1000 Вт. Ультразвук на частотах 18, 20 и 25 кГц снизил вязкость нефти до 480, 890 и 920 МПа·с соответственно, хотя время облучения повлияло на эти изменения.

Результаты также показали, что кавитация, вызванная 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. Этот вывод согласуется с исследованиями [26] о влиянии мощности и частоты ультразвука на мобилизацию нефти в пористых средах. Они проверили диапазон частот и мощности ультразвуковых волн и пришли к выводу, что скорость восстановления соответствует частоте и мощности ультразвука.

В работе [27] изучали влияние ультразвуковой обработки на вязкость и температуру застывания сырой нефти с различными составы по n-алканам и смолисто-асфальтоновым компонентам. 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 низкопарафиновых нефтей с высоким содержанием смол и асфальтонов приводит к значительному снижению вязкости и температуры застывания, а эффективность ультразвуковой обработки увеличивается с увеличением времени обработки.

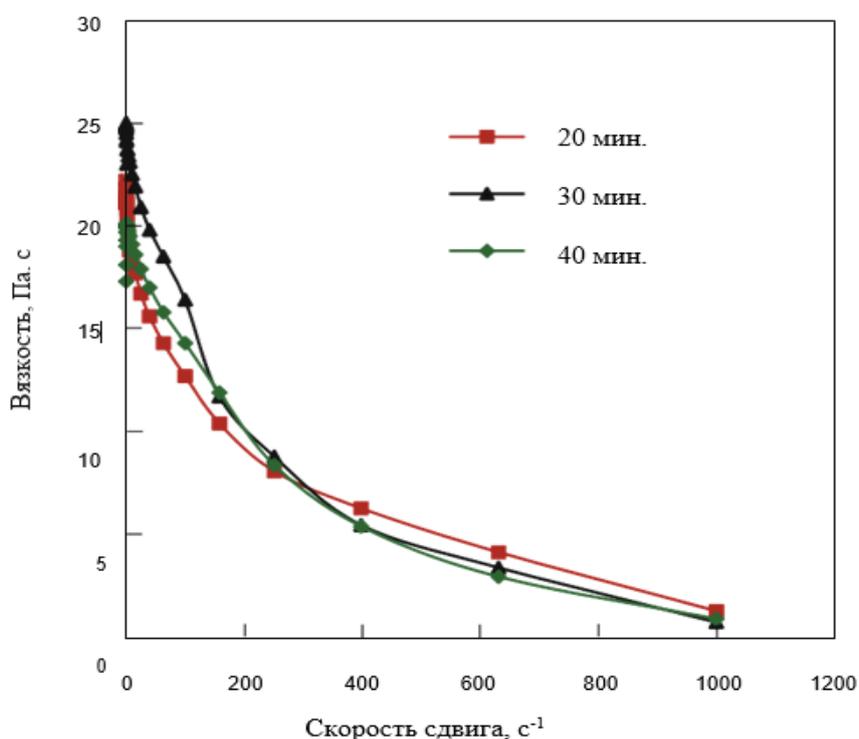
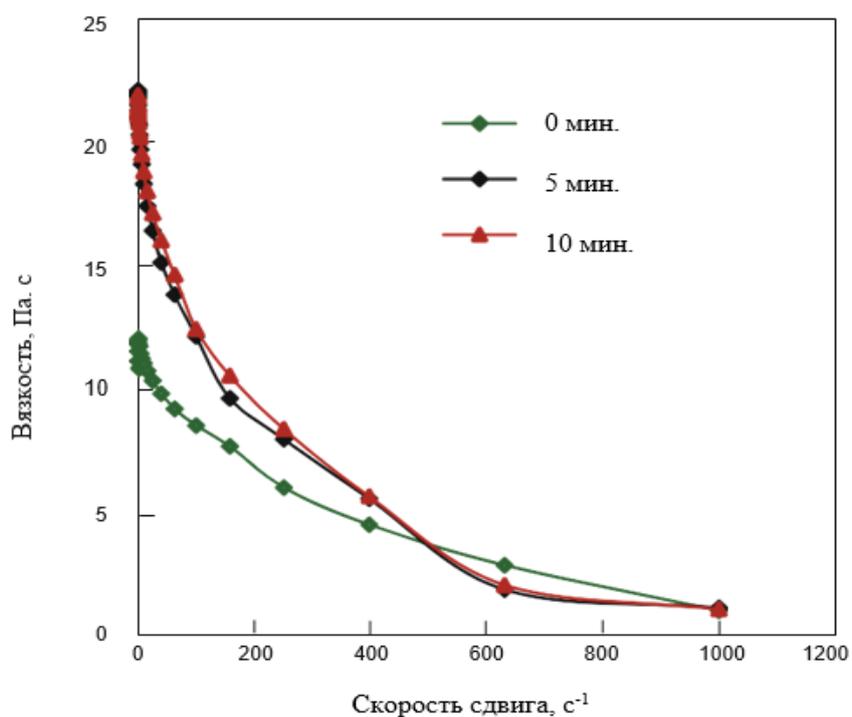
В некоторых других исследованиях [28,29] провели различные тесты капиллярной пропитки на образцах горных пород и на визуальных

микромоделях, чтобы проанализировать влияние ультразвука на нефтеотдачу и взаимодействие флюид-порода для различных условий смачиваемости. Они обнаружили, что ультразвук по-разному влияет на относительную проницаемость породы для поверхностей, смоченных нефтью, и поверхностей, смоченных водой. Смоченные нефтью поверхности показали постепенное восстановление за счет возбуждения ультразвуковой волны. Их результаты также показали, что скорость восстановления увеличивалась на более высоких частотах; однако окончательный коэффициент извлечения существенно не изменился.

В работе [30] изучали реологическое поведение ряда образцов сырой нефти, подвергнутых ультразвуковой стимуляции, в различные интервалы времени. Кроме того, они исследовали влияние температуры на изменения вязкости образцов тяжелой нефти с помощью пары экспериментов с установившимся и колеблющимся сдвиговым потоком. Исследование показало, что тяжелые компоненты растворяются в сырой нефти в результате обработки ультразвуком (ультразвуковая стимуляция с частотой 45 кГц). После ультразвукового облучения в одной из проб сырой нефти Kouh-e Mond (Кух-Монд месторождении тяжелой нефти) обнаружена псевдопластическая жидкость поведение. Путем визуализации было отмечено, что существует оптимальное время ультразвуковой обработки, необходимое для эффективного снижения вязкости сырой нефти и оптимального предотвращения флокуляции осадков в асфальтеновой сырой нефти. Было обнаружено, что для сырой нефти Kouh-e-Mond оптимальное время выдержки составляет примерно 40 минут. В исследовании авторы пришли к выводу, что ультразвуковые волны способны разрушать тяжелые коллоидные компоненты сырой нефти, а разрушение молекул асфальтенов возможно только выше определенной продолжительности ультразвукового облучения. Кроме того, эксперимент с изменением температуры показал, что повышение температуры олеиновой фазы, вызванное ультразвуком, не было ключевой причиной реологических изменений сырой нефти. Изменения могут быть связаны с самими ультразвуковыми волнами. На рис. 3 показано влияние скорости сдвига на изменения вязкости образца нефти до и после обработки ультразвуком. Влияние на вязкость сырой нефти Kouh-e-Mond становится значительным по мере того, как образец обрабатывается ультразвуком в течение 40 мин. Эта информация может быть жизненно важной для исследований в полевых условиях в случае залежей тяжелой нефти, где присутствие асфальтенов проблематично; вызывая закупорку пор, закупорку в

призабойной зоне скважины и увеличение вязкости жидкости. Ультразвук может хорошо разбираться в разрушении и растворении молекул асфальтенов при одновременном снижении вязкости жидкости.

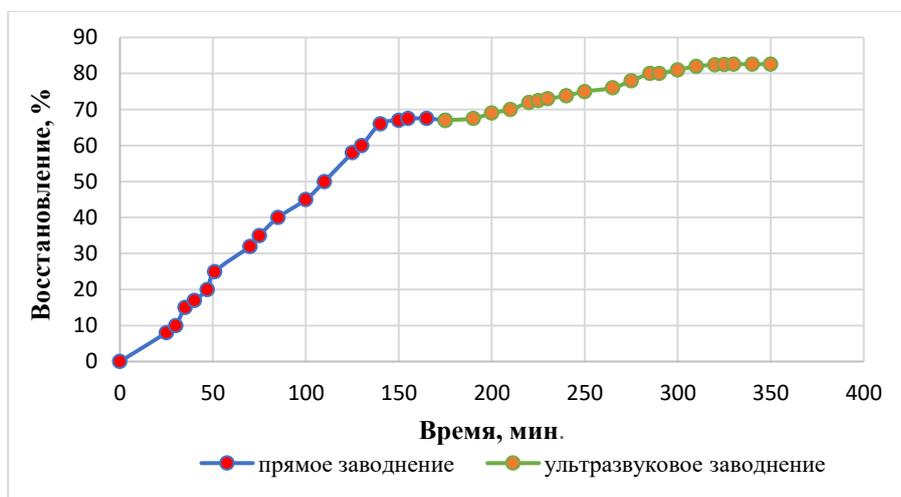
В работе [31] провели несколько испытаний заводнения с помощью ультразвука, чтобы исследовать влияние ультразвука на нефтеотдачу, скорость и механизмы ее управления. Использовался пакет из кварцевого песка, который подвергался ультразвуковому излучению с частотой 40 кГц и мощностью 100–500 Вт. Был сделан вывод о том, что основными механизмами, способствующими этому явлению, являются кавитация, снижение вязкости и др. и эмульгирование. Эффект кавитации был отмечен из-за разницы в извлечении при закачке обычного рассола и деаэрированного рассола.



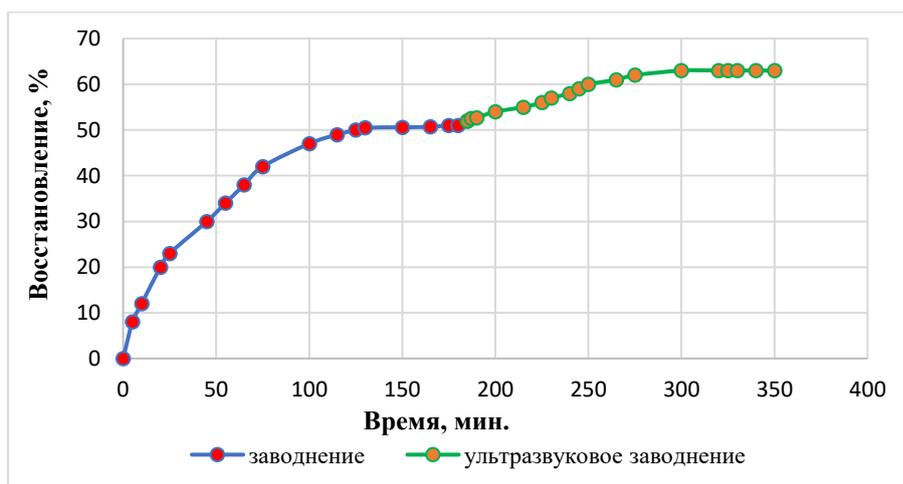
**Рисунок 2.3 – Влияние скорости сдвига на изменение вязкости образца нефти (сырой нефти Kouh-e-Mond) до и после ультразвукового облучения [30].**

Резкое повышение температуры привело к снижению вязкости нефти и межфазному поверхностному натяжению (МПН), что увеличило коэффициент извлечения нефти. На рис. 2.4 показано общее извлечение керосина и вазелина в

результате воздействия ультразвука на процессы заводнения. По-видимому, заводнение с помощью ультразвука увеличило время прорыва воды во время добычи нефти.



а) Восстановление керосина



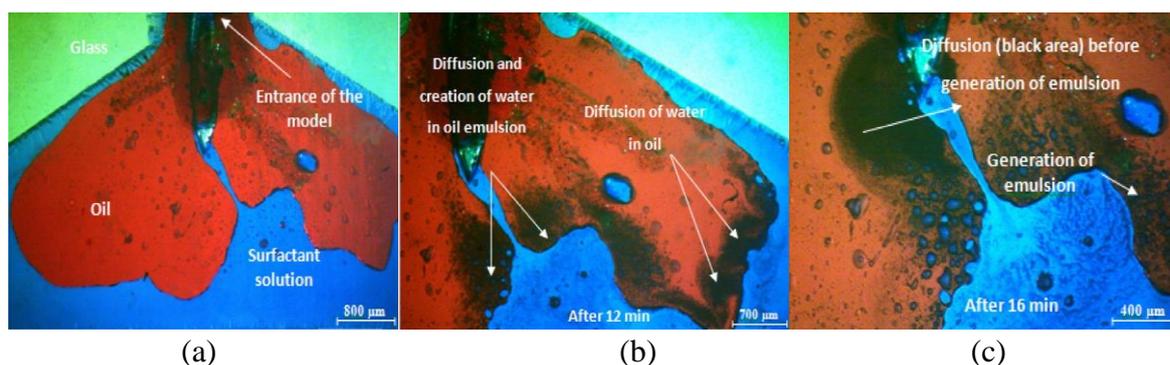
б) Восстановление вазелина

**Рисунок 2.4 – Восстановление керосина (а) и вазелина (б) из-за воздействия ультразвука на заводнение [30]**

Подобные результаты были обнаружены в исследованиях [32] они тщательно исследовали влияние ультразвука на перепад давления и изменение вязкости oleиновой фазы в пористой среде. Они проверили диапазон частот и мощности ультразвука с различными типами нефти и обнаружили, что тепловыделение, кавитация и снижение вязкости являются наиболее вероятными механизмами, которые следует учитывать для методов повышения нефтеотдачи с помощью ультразвуковых приложений.

Способность ультразвука увеличивать подвижность нефти была изучена в работе [33] с использованием серии лабораторных экспериментов с образцами керна. В работе [23] было проведено несколько экспериментов, где керны были обводнены вертикально и горизонтально с применением ультразвуковой техники при начальной нефтенасыщенности и остаточной нефтенасыщенности после проведения первоначального заводнения. Для подачи ультразвуковых волн использовалась высокочастотная ультразвуковая ванна Clifton MU-22, генерирующая волны с частотой 50 кГц. Они пришли к выводу, что волновая стимуляция продемонстрировала улучшение скорости извлечения как при горизонтальном, так и при вертикальном заводнении керна; взаимодействие жидкости и волны внутри пор приводит к изменению относительной проницаемости и увеличению дебита нефти.

В работе [34] изучалось воздействие ультразвука на границы раздела рассола и нефти в пласте с использованием модели Hele-Shaw (Хеле-Шоу). Применение ультразвука вызвало диффузию фаз, а также образование эмульсий, однако более длительное время облучения вызывает дэмульгирование и коалесценцию капель рассола в эмульсиях. Их результаты показали, что, используя короткие импульсы ультразвуковых волн, эмульгирование, возможно, является одним из механизмов, которые могут улучшить процесс добычи нефти, как показано на рис. 2.5. На этом рисунке показано влияние 12-минутного и 16-минутного излучения ультразвука на водную среду, слипание капель и эмульгирование нефти в модели Хеле-Шоу. Авторы также исследовали влияние ультразвуковых волн на восстановление процесса заводнения ПАВ [35]. Анализ фазового поведения поверхностно-активного вещества-рассола-нефти показал, что МПН стоит значительно ниже и что использование ультразвука снижает количество поверхностно-активного вещества, необходимого для заводнения ПАВ. Однако из-за изоэнтальпности таких процессов развитие теоретических моделирование ультразвукового МУН остается проблемой.



**Рисунок 2.5 – Конфигурация раствора поверхностно-активного вещества, эмульгирование нефти и коалесценция водных капель через 16 мин воздействия ультразвуковых волн в модели Хеле-Шоу. (а) через 0 мин, (б) через 12 мин, (в) через 16 мин [35]**

В одном из исследований [36] изучалось влияние ультразвука на восстановление после заводнения  $\text{CO}_2$ . Был проведен ряд тестов на закачку  $\text{CO}_2$  в присутствии ультразвука в двух различных температурных условиях: контролируемом и неконтролируемом. Наблюдалось улучшение нефтеотдачи при использовании ультразвукового заводнения с использованием  $\text{CO}_2$  по сравнению с обычным заводнением  $\text{CO}_2$ . Хотя можно было увидеть, что улучшение извлечения было более значительным для тестов на закачку  $\text{CO}_2$  с помощью ультразвука с неконтролируемой температурой условия. Авторы пришли к выводу, что ультразвук создает более устойчивую границу раздела между вытесняемой и вытесняющей текучими средами, что может быть результатом снижения вязкости текучей среды, а также МПН и капиллярного давления в текучих средах.

Другие результаты лабораторных исследований показывают, что КИН повышается при увеличении нефтеотдачи с ультразвуковой мощностью преобразователя в диапазоне 100 - 350 Вт и частота ультразвука 20 кГц [37]. После 30 минут непрерывной обработки ультразвуком была достигнута высокая степень извлечения около 88,2% исходной нефти на месторождении.

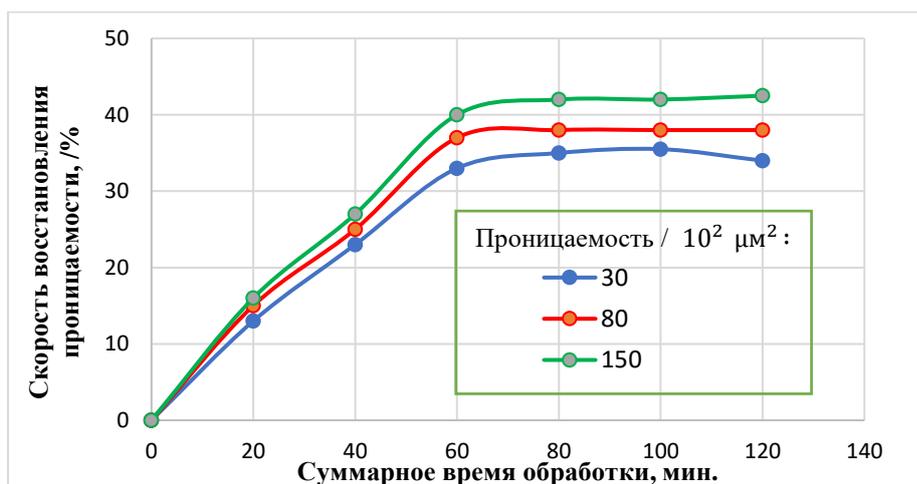
## **2.5 Влияние ультразвука на повреждение пласта в пористой среде**

Повреждение пласта остается препятствием для добычи нефти на недрах. Еще одно возможное применение ультразвука - стимуляция призабойной зоны скважины и, возможно, пласта. С помощью этого метода повреждения пласта из-

за миграции мелких частиц, отложения асфальтенов и парафина, а также отложения накипи можно обрабатывать с помощью или без помощи химикатов.

В работе [38] изучали влияние мощности, частоты и времени ультразвукового возбуждения на ультразвуковую обработку отложений неорганических отложений в призабойной зоне скважины. Они обнаружили, что чем выше мощность ультразвука и время возбуждения, тем лучше процесс очистки ствола скважины. Они показали, что оптимальное время обработки составляет около 80–120 мин, как показано на рис. 2.6.

Эксперименты с применением ультразвука на образцах керна, поврежденных парафином и отложениями накипи, показали, что керн проницаемость может быть увеличена [38]. Было обнаружено, что эффективность ультразвука зависит от частоты и мощности приложенного звукового поля. Например, увеличение частоты и мощности примерно на 40 кГц и 1000 Вт соответственно может улучшить обработку сердечника, но повреждение сердечника может также произойти на частотах выше 40 кГц [38].



**Рисунок 2.6 – Влияние времени возбуждения ультразвука на удаление накипи [38]**

Дополнительным доказательством влияния ультразвука на органические отложения являются исследования по визуализации удаления асфальтенов из пористых сред с использованием микромоделей из стекла 2D, проведенные при 20 кГц, 40 Вт [39] и 30 кГц, 100 Вт. Авторы показали, что ультразвук может значительно уменьшить осаждение асфальтенов и предотвратить его отложение в пористых средах, однако чрезмерное воздействие ультразвука на образцы увеличивало ущерб, нанесенный асфальтенами [39]. Установлено, что основным

механизмом воздействия ультразвука, способствующим предотвращению отложения асфальтенов, являются вибрации.

В работе [40] была разработана математическая модель, которая может анализировать механизм просачивания жидкости в пористой среде, вызванный ультразвуком. Закон сохранения количества движения, законы Дарси и Стокса были объединены для разработки новой модели для прогнозирования абсолютной проницаемости пористой среды во время ультразвуковой обработки.

Удивительно, но результат показал, что проницаемость пористой среды не зависит от параметров волны. Был также сделан вывод о том, что ультразвук действует против эффекта капиллярного давления, что означает, что некоторый период воздействия ультразвукового излучения приводит к снижению вязкости жидкости, а затем к увеличению вязкости после более длительного воздействия.

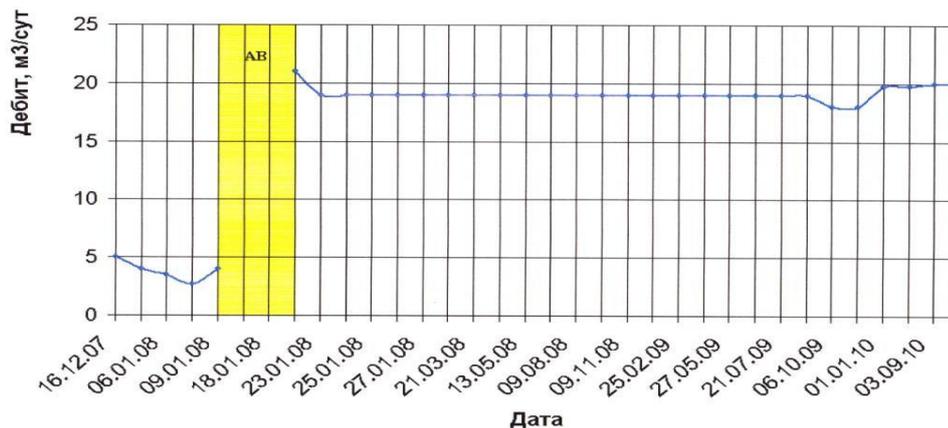
В работе [41] смоделировали влияние высокочастотной вибрации на плотность жидкости, пористость и проницаемость горных пород с использованием принципов разработки резервуаров, потока жидкости в пористой среде, численного анализа и механики горных пород. Их исследование было успешно применено к нефтяной скважине в Западном Китае, где применение акустической частоты 20 кГц привело к улучшенной проницаемости коллектора (от 11,4 мД до 22 мД), снижение вязкости нефти (от 63,5 мПа.с до 37 мПа.с) и, как следствие, более длительный период добычи (от 60 до 120 дней) с 50 м<sup>3</sup> нефти в сутки.

В работе [42] исследовали применение ультразвукового усиления на разрушающихся лунках путем стимуляции лунок с помощью источника ультразвука. В коллекторах с проницаемостью 20 мД и пористостью 15% ультразвуковая стимуляция (25 кГц) позволила увеличить дебит по крайней мере на 50%, а для скважин с более высокой проницаемостью и пористостью этот показатель может достигать 85%.

В работе [43] провели практические исследования на Сотчемьюском месторождении нефти (МН) и изучали эффект от применения акустического воздействия (АВ) до и после. Результат показал, что увеличение дебита скважины повысилось в 4,5 раза (450%) и продолжалось более 2-х лет. Динамика добычи нефти взятой скважины Сотчемьюского МН до и после применения АВ представлена на рисунке 2.7. Автор пришел к выводу, что при подготовке к проведению работ по АВ важно провести тщательный анализ всей истории работы скважины, включающая информацию о режимах эксплуатации

скважины за весь период, о ее конструкции, а также характеристику нефтегазонасыщенной части пласта (тип коллектора, пластовое и забойное давление, пористость, интервалы перфорации, проницаемость, дебит, профиль притока).

Рекомендуются дополнительные лабораторные исследования для изучения и подтверждения этого результата. Было создано резюме некоторых лабораторных исследований, в таблице приводится сводка некоторых лабораторных и математических исследований.



**Рисунок 2.7 – Динамика добычи нефти до и после применения АВ на скважине Сотчемьюского месторождения [43]**

Лабораторные исследования, рассмотренные в этой статье, включают недавние работы, которые были проведены в ультразвуковом диапазоне частот 20–125 кГц, интенсивность ультразвука 30–2000 Вт и применение ультразвука время до 240 мин.

*Таблица 2.1*

**Резюме некоторых лабораторных исследований [23, 44]**

Ссылка	Наблюдаемые эффекты с помощью ультразвука	Диапазон частот	Диапазон интенсивности	Продолжительность возбуждения
Hamidi et al. [18]	Увеличение дебита нефти по мере увеличения частоты и мощности ультразвуковых волн.	25–40 кГц 20–68 кГц	250–500 Вт 50–500 Вт	-
Agi et al. [45]	Заводнение водой и поверхностно-активными веществами с ультразвуковой поддержкой улучшило нефтеотдачу до 11% и 12% соответственно	40 кГц	500 Вт	3 - 90 мин

Продолжение табл. 2.1

Agi et al. [47]	при прерывистой ультразвуковой обработке было извлечено больше нефти по сравнению с непрерывной ультразвуковой обработкой во время ультразвуковой операции	40 кГц	500 Вт	-
Ghamartale et al. [47]	Ультразвук может изменить морфологию коллектора из-за возникновения микротрещин и / или отслоения частиц породы.	30 кГц	100 Вт	-
Rezaei Dehshibi et al. [24]	Ультразвук улучшил нефтеотдачу, подвижность нефти и, в конечном итоге, пути проникновения нефти, но это зависело от геометрии пор. Больше эффектов наблюдалось для масел с более низкой вязкостью.	30 кГц	100 Вт	-
Tan et al. [49]	Мощность ультразвука была наиболее важным фактором для нефтеотдачи по сравнению с другими параметрами, такими как частота, время, температура и pH.	25–125 кГц	120–300 Вт	15–120 мин.
Mohammadian et al. [50]	Мощность ультразвука оказывает наибольшее влияние на нефтеотдачу по сравнению с частотой ультразвука	25, 40 и 65 кГц	50 - 500 Вт	-
Wang et al. [50]	Ультразвуковая комбинация химикатов оказала лучший эффект на устранение чувствительности к воде, чем использование только ультразвуковой обработки или химического введения.	30 кГц	1000 Вт	-
Khan et al. [51]	Ультразвуковая комбинация химикатов дает лучший эффект для удаления повреждений, чем использование только ультразвуковой обработки или химического введения.	20 кГц	1000 Вт	-
Wang et al. [52]	Наиболее важными факторами для снижения вязкости тяжелой нефти являются частота ультразвука, мощность и время воздействия.	18–25 кГц	100–1000 Вт	5–30 мин.
Mullakaev et al. [27]	Эффективность ультразвуковой обработки сырой нефти зависит от состава масел.	24,3 кГц	4000 Вт	до 15 мин.

Продолжение табл. 2.1

Aliev et al. [53]	Ультразвуковая стимуляция снизила вязкость и улучшила показатели переработки сверхтяжелой нефти	24 кГц	200 Вт	30 с - 30 мин.
Rahimi et al. [54]	Ультразвук снизил вязкость сверхтяжелой нефти за 10 минут оптимального времени облучения.	20 кГц	100 Вт	10 мин.
Naderi and Babadagli. [28]	После прорыва в моделях, смачиваемых нефтью, ультразвук был эффективен, в то время как в моделях, смачиваемых водой, влияние ультразвука было незначительным в отношении коэффициента извлечения-развертки.	20–40 кГц	35–250 Вт/см <sup>2</sup>	-
Naderi and Babadagli [55]	Скорость восстановления увеличивается, но общее восстановление остается прежним.	22–40 кГц	от 45 до 84 Вт / см <sup>2</sup>	-
Mousavi et al. [30]	Ультразвук способствует растворению тяжелых компонентов в сырой нефти.	45 кГц	72 Вт	5 - 240 мин.
Mohammadian et al. [31]	Сделан вывод, что способствующими механизмами извлечения нефти из-за обработки ультразвуком являются кавитация, снижение вязкости и эмульгирование.	40 кГц	100–500 Вт	-
Namidi et al. [32]	Наблюдаемый эффект повышения нефтеотдачи - кавитация, тепловыделение и снижение вязкости под действием ультразвука.	25–40 - 68 кГц	100–250 - 500 Вт	60 мин.

## ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2

Были проведены пересмотр лабораторных исследований, численного моделирования и полевых испытаний применения ультразвука. Результаты полевых исследований совпали с некоторыми результатами лабораторных исследований и математическими моделями, включая снижение вязкости нефти, уменьшение остаточной нефтенасыщенности и повышение нефтеотдачи при использовании ультразвукового излучения.

В данном разделе представлены последние лабораторные эксперименты по повышению нефтеотдачи и устранению повреждений пласта с применением

ультразвуковых волн. По сообщениям, ультразвуковая технология может быть применена для устранения повреждений пласта и увеличения нефтеотдачи в подземных нефтяных пластах. Вибрации, пузырьковая кавитация и трение, вызываемые ультразвуком, могут предотвратить коагуляцию тяжелой нефти; измерения показали, что ультразвуковое облучение способно снизить вязкость тяжелой нефти на 86%. Тепло, генерируемое при продолжительной обработке ультразвуком, также способно снизить вязкость эмульсии и способствовать ее разрушению. Деформация пор, вызываемая ультразвуком, может привести к увеличению нефтеотдачи и восстановлению поврежденных пластов.

## **Литература к главе 2**

1. Luo X. Recent advances in applications of power ultrasound for petroleum industry / X. Luo, H. Gong, Z. He et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – No 70. – P. 105337. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105337. Epub 2020 Sep 3.
2. Wang Z.J. State-of-the-art on the development of ultrasonic equipment and key problems of ultrasonic oil production technique for EOR in China / Z.J. Wang, S.M. Gu // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – No 82. – P. 2401–2407.
3. Fu L. Study on dual-frequency ultrasounds assisted surfactant extraction of oil sands /, G. Zhang, J. Ge, K. Liao et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – No 167. – P. 146–152.
4. Huang X. Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic / C. Zhou, Q. Suo, S. Wang // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2018. – No 41. – P. 661–669.
5. Mhatre S. Demulsifier assisted film thinning and coalescence in crude oil emulsions under DC electric fields / S. Mhatre, S. Simon, J. Sjöblom et al. // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2018. – No 134. – P. 117–129.
6. Hu G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review / G. Hu, J. Li, G. Zeng // *Journal of Hazardous Materials*. – 2013. – No 261. – P. 470–490.
7. Hu G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review / G. Hu, J. Li, G. Zeng // *Journal of Hazardous Materials*. – 2013. – No 261. – P. 470–490.
8. Mohsin M. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation / M. Mohsin, M. Meribout // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2015. – No 23. – P. 413–423.

9. Qiu L.Q. Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: Effect on process efficiency and product quality / L.Q. Qiu, M. Zhang, B. Chitrakar et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2020. – No 68.
10. Castro M.D.L.D. Analytical Application of Ultrasound / M.D.L.D Castro, F.R.P Capote // Elsevier, 2007.
11. Kerboua K. Insights into numerical simulation of controlled ultrasonic waveforms driving single cavitation bubble activity / K. Kerboua, O. Hamdaoui // *Ultrasonics Sonochemistry*. –2018. –No43. –P237–247.
12. Kerboua K. Computational study of state equation effect on single acoustic cavitation bubble's phenomenon / K. Kerboua, O. Hamdaoui // *Ultrasonics Sonochemistry*. –2017. –No38. –P174–188.
13. Peng C. Simulation of laser-produced single cavitation bubbles with hybrid thermal Lattice Boltzmann method / C. Peng, S. Tian, G. Li et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. –2020. –No149.
14. Mettin R. Sonochemistry and bubble dynamics / R. Mettin, C. Cairos, A. Troia // *Ultrasonics Sonochemistry*. –2015. –No25. –P24–30.
15. Emil A.B. Shock wave emission and cavitation bubble dynamics by femtosecond optical breakdown in polymer solutions / Emil A.B // *Ultrasonics Sonochemistry*. –2019. – No 58. –P. 104694–104701.
16. Rivas D.F. Ultrasound artificially nucleated bubbles and their sonochemical radical production / D.F. Rivas, L. Stricker, A.G. Zijlstra et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – No 20(1). – P. 510–524.
17. Sirés I. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow, a review / I. Sirés, E. Brillas, M.A. Oturan et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – No 21. – P. 8336–8367.
18. Johansson L. Cavitation and non-cavitation regime for large-scale ultrasonic standing wave particle separation systems – in situ gentle cavitation threshold determination and free radical related oxidation / L. Johansson, T. Singh, T. Leong et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016. – No 28. – P. 346–356.
19. Show K.Y. Optimization of sludge disruption by sonication / K.Y. Show, T. Mao, D.J. Lee // *Water Research*. – 2007. – No 41. – P. 4741–4747.
20. Luo X. Study on separation characteristics of water in oil (W/O) emulsion under ultrasonic standing wave field / X. Luo, J. Cao, H. Yan et al. // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2018. – No 123. – P. 214–220.
21. Wood R.J. A parametric review of sonochemistry: control and augmenta-

tion of sonochemical activity in aqueous solutions / R.J. Wood, J. Lee, M.J. Bussemaker // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2017. – No 38. – P. 351–370.

22. Mason T.J. *Applied Sonochemistry: The uses of power ultrasound in chemistry and processing* / T.J. Mason, J.P. Lorimer // Wiley-VCH, 2002.

23. H. Hamidi. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results / H. Hamidi, S.H. Amin, W.O. Ephraim et al. // *Ultrasonics*. – 2021. – No 110(106288). – P. 1–13.

24. Dehshibi R.R. Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model / R.R. Dehshibi, M. Ali, R. Masoud et al. // *Fuel*. – 2019. – No 239. – P. 709–716.

25. Wang Z. Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery / Z. Wang, X. Yuanming, G. Yuting. // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2015. – No 27. – P. 171–177.

26. Hamidi H. A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs / H. Hamidi, R. Rafati, R. Junin et al. // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2012. – No 2(1). – P. 29–36.

27. Mullakaev M.S. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions / M.S. Mullakaev, G.I. Volkova, O.M. Gradov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – No 49(3). – P. 287–296.

28. Naderi K. Visual analysis of immiscible displacement processes in porous media under ultrasound effect / K. Naderi, T. Babadagli // *Physical Review E*. – 2011. – No 83(5 pt 2). – P. 056323-1–056323-14.

29. Naderi K. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types / K. Naderi, T. Babadagli // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – No 17(3). – P. 500–508.

30. Mousavi S.M. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils / S.M. Mousavi, R.S.A. Ahmad, I. Najafi et al. // *Petroleum Science*. – 2012. – No 9(1). – P. 82–88.

31. Mohammadian E. Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding / E. Mohammadian, R. Junin, A.K. Idris // *Ultrasonics*. – 2013. – No 53(2). – P. 607–614.

32. Hamidi H. Technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium / H. Hamidi, E. Mohammadian, R. Junin et al. // *Ultrasonics*. – 2014. – No 54(2). – P. 655–662.

33. Alhomadhi E. Experimental application of ultrasound waves to improved

oil recovery during waterflooding / E. Alhomadhi, M. Amro, M. Almobarky // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – 2014. – No 26(1). – P. 103–110.

34. Hamidi, H. Effect of ultrasound radiation duration on emulsification and demulsification of paraffin oil and surfactant solution/brine using Hele-shaw models / H. Hamidi, E. Mohammadian, M. Asadullah el al. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – No 26. – P. 428–436.

35. Hamidi, H. The effect of ultrasonic waves on the phase behavior of a surfactant–brine–oil system / H. Hamidi, E. Mohammadian, R. Rafati el al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2015. – No 482. – P. 27–33.

36. Hamidi, H. Ultrasound-assisted CO<sub>2</sub> flooding to improve oil recovery / H. Hamidi, A.S. Haddad, E. Mohammadian el al. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – No 35. – P. 243–250.

37. Mohsin, M., Meribout, M. An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation / M. Mohsin, M. Meribout // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – No 23. – P. 413–423.

38. Pu, C., Shi, D., Zhao, S., Xu, H. Technology of removing near well-bore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment / C. Pu, D. Shi, S. Zhao el al. // Petroleum Exploration and Development. – 2011. – No 38(2). – P. 243–248.

39. Salehzadeh, M. Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition / M. Salehzadeh, A. Ali, A. Forough // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2016. – No 94(11). – URL: [https://www.researchgate.net/publication/305339649Experimental\\_study\\_of\\_ultrasonic\\_radiation\\_on\\_growth\\_kinetic\\_of\\_asphaltene\\_aggregation\\_and\\_deposition](https://www.researchgate.net/publication/305339649Experimental_study_of_ultrasonic_radiation_on_growth_kinetic_of_asphaltene_aggregation_and_deposition)

40. Najafi, I. A. Mathematical Analysis of the Mechanism of Ultrasonic Induced Fluid Percolation in Porous Media: Part I / I.A. Najafi // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence, Italy, 19–22 September 2010. – SPE 141126.

41. Guo, X. Computer Modeling and Simulation of High Frequency Vibration Recovery Enhancement Technology in Low-Permeability Reservoirs / X. Guo, Z. Du, Z. Li // Trinidad and Tobago Energy Resources Conference held in Port of Spain, Trinidad, 27–30 June 2010. – SPE 132866.

42. Abramov, V.O. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation / V.O. Abramov, M.S. Mullaev, A. Abramova el al. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2013. – No 20(5). – P. 1289–1295.

43. Умняев, В.Г. Развитие методов акустического воздействия из

скважин с целью повышения конденсатоотдачи пласта: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / В.Г. Умняев. – Ухта, 2013. – 23 с.

44. Алфаяд А.Г.Х. Применение ультразвукового воздействия для повышения нефтеотдачи / А.Г.Х. Алфаяд, Д.З. Валиев, Р.А. Кемалов и др. // Технологии нефти и газа. – 2023. – № 2 (145). – С. 36-43.

45. Agi A. Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding / A. Agi, J Radzuan, S Ramin et al. // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – 2019. – No 31(3). – P. 296–303.

46. Agi A. Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery / A. Agi, R. Junin, A.S. Chong // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – No 166. – P. 577–591.

47. Ghamartale A. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure / A. Ghamartale, M. Escrochi, M. Riazi et al. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – No 51. – P. 305–314.

48. He, S. Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge / S. He, X. Hu, Xi. Tan et al. // Environmental Technology. – 2019. – No 40 (11). – P. 1401–1407.

49. Mohammadian, E. The Effects of Properties of Waves on the Recovery of Ultrasonic Stimulated Waterflooding / E. Mohammadian, M. Parak, P. Babakhani // Petroleum Science and Technology. – 2014. – No 32(8). – P. 1000–1008.

50. Wang, Z. Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-chemical agent for enhanced oil recovery / Z. Wang, J. Huang // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – No 42. – P. 754–758.

51. Khan, N. Comparison of Acidizing and Ultrasonic Waves, and Their Synergistic Effect for the Mitigation of Inorganic Plugs / N. Khan, C. Pu, P. Jingyang et al. // Energy & Fuels. — 2017. — No 31(10). — P. 11134–11145.

52. Wang, Z. Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery / Z. Wang, Y. Xu, Y. Gu // Ultrasonics Sonochemistry. — 2015. — No 27. — P. 171–177.

53. 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. — 2017. — No 17(14). — P. 941–948.

54. Rahimi M.A. Effect of ultrasonic irradiation treatment on rheological behaviour of extra heavy crude oil: A solution method for transportation improvement / M.A. Rahimi, H.A. Alijanvand, A. Ramazani // The Canadian Journal of Chemical

Engineering. — 2017. — No 95(1). — P. 83–91.

55. Naderi K. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types / K. Naderi, T. Babadagli // Ultrasonics Sonochemistry. — 2010. — No 17(3). — P. 500–508.

### **3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ ПОР-ЖИДКОСТЬ-ГАЗ ПЛАСТА**

#### **3.1 Краткие физические основы применения ультразвуковых и звуковых колебаний**

Физическая природа всех звуков одина. Нет существенной физической разницы между, например, ультразвуком и слышимым звуком. Большинство закономерностей, характерных для звуковых колебаний, может быть перенесено и на ультразвуковые колебания. Однако полного тождества между ними провести нельзя, так как с повышением частоты изменяется ряд свойств упругих колебаний, и, соответственно, их воздействие на вещества.

Интенсивность ультразвуковых колебаний в окружающей природе невелика. Она того же порядка, что и интенсивность человеческой речи и слышимых звуков ( $\sim 10$  мкВт/м<sup>2</sup>). В случае же получения звуковых и ультразвуковых колебаний от искусственных источников их мощность может достигать десятков, сотен Вт или даже нескольких кВт, а интенсивности — десятков и сотен кВт/м<sup>2</sup>. Колебания высокой интенсивности характеризуются рядом особенностей, отличающих их от колебаний малой интенсивности. Это так называемые эффекты второго порядка. Еще далеко не все эффекты второго порядка имеют точное физическое объяснение. Однако ввиду того, что они сопутствуют ультразвуковым колебаниям высокой и средней интенсивности, укажем на некоторые из них, представляющие интерес для промышленного использования.

При распространении звуковых волн в среде возникает чередование сжатия и разрежения, причем амплитуда сжатия всегда равна амплитуде разрежения, а их чередование соответствует частоте колебаний звуковой волны. Это явление называют звуковым давлением.

Опыт показывает, что мощный излучатель не только приводит в колебательное движение прилегающие к нему частицы той или иной среды относительно их положения равновесия, но и вызывает постоянное их смещение, постоянный поток, который носит название звукового ветра. Эффект звукового ветра представляет существенный интерес постольку, поскольку он проявляется в виде сильных течений, приводящих к перемешиванию среды, а, как известно, перемешивание в значительной мере ускоряет многие химико-технологические процессы.

При распространении интенсивных ультразвуковых колебаний в жидкости наблюдается тесно связанный со звуковым давлением эффект, называемый ультразвуковой кавитацией. Явление кавитации связано главным образом с тем, что жидкости, легко «переносят очень большие всесторонние сжатия, но чрезвычайно чувствительны к растягивающим усилиям. При прохождении фазы волны, создающей разрежение, жидкость рвется, и в ней образуется очень большое количество разрывов в виде мельчайших пузырьков, появляющихся обычно в тех местах, где прочность жидкости ослаблена: такими местами являются маленькие пузырьки газа, частицы посторонних примесей и др. Эти маленькие полости, так называемые кавитационные пузырьки, совершают пульсирующие колебания, вокруг них образуются сильные микропотоки, и все это приводит к активной местной турбулизации среды. После кратковременного существования часть пузырьков захлопывается. Во время этих захлопываний развиваются большие местные мгновенные давления, достигающие сотен и тысяч атмосфер. При захлопывании кавитационных пузырьков наблюдаются также местные повышения температуры и электрические разряды. Необходимая для развития кавитации интенсивность ультразвука зависит от частоты колебаний и от природы жидкости.

### **3.2 Методология расчётов влияния волнового воздействия по системе жидкость-газ пласта**

Упругая волновая мобилизация остаточной нефти в неоднородных коллекторах представляет собой эффективный, экономически выгодный и экологически безопасный метод повышения нефтеотдачи пластов. В настоящее время применение упругих (сейсмических) волн на уровне резервуара находится на начальных этапах исследования и разработки. В этом исследовании мы применяем двухслойный численный метод конечных элементов для анализа возможности эффективного распространения сейсмических волн в зонах с низкой проницаемостью зрелых нефтяных пластов при передаче сейсмической нагрузки в породную матрицу через скважинный источник. Целью данного исследования является оценка потенциала амплитуд смещения флюида и породной матрицы для создания перетоков в зрелом нефтяном пласте путём разработки математической модели, моделирующей влияние волнового воздействия на систему пор-жидкость-газ пласта.

В пластах с низкой проницаемостью численные результаты демонстрируют, что с приближением радиуса наблюдения к границе пласта смещение породной

матрицы во временной области лучше работает как параметр распространения волн, чем смещение поровой жидкости. Тем не менее, колебания поперечного потока на мезоскопической пиковой частоте 3,0 Гц обеспечивают мгновенную скорость переноса нефти (коэффициент извлечения) в размере 2,5% (перепускаемая нефть) из зоны с низкой проницаемостью. Этот метод может быть использован в сочетании с заводнением для извлечения большего объема нефти как из высокопроницаемых, так и из низкопроницаемых зон. Следовательно, мезоскопическая частота затухания может служить одним из индикаторов для оценки эффективности нефтеотдачи в неоднородных нефтяных пластах.

### 3.2.1 Методология

#### 3.2.1.1 Физика упругих волн

Волны сжатия генерируются из источника в скважине и передаются в пласт-коллектор в системе полуплоскости (рис. 3.1) [14,28].  $b(m)$  обозначает радиус нефтяного пласта,  $\theta^\circ$  обозначает угол падения Р-волн, а  $h(m)$  обозначает коэффициент глубины пласта. Предполагается, что нефтяной пласт содержит пороупругие слои (пористые, проницаемые и упругие), окружённые непроницаемым упругим твердым пластом. Уравнения в частных производных (ЧПУ) управляют передачей Р-волн внутри связанной модели пороупругой и упругой твердой породы ( $\Omega = (0, L)$ ) [17]. Уравнение (3.1) определяет распространение волн сжатия через упругие твердые образования. Модифицированная модель связанных волн сжатия Био для насыщенных флюидом пороупругих слоев пласта может быть математически выражена уравнениями (3.2) и (3.3). Уравнение (3.2) представляет формулировку связанного движения твердого тела и жидкости, а уравнение (3.3) представляет модифицированный закон Дарси в терминах сил инерции связанного движения твердого тела и жидкости.  $x(m)$  представляет местоположение, а  $t(s)$  представляет время. Границы между непроницаемым упругим телом и пороупругими слоями обозначены как  $x_p$  и  $x_p + Npl_s$ . Индекс верхнего или более проницаемого пороупругого слоя обозначается индексом  $p$ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial u_a^2}{\partial t^2} = 0, \quad x \in \Omega \setminus \Omega_p, \quad t \in (0, T), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial u_b}{\partial x} + \alpha Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial u_b^2}{\partial t^2} - \rho_f \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad x \in \Omega_p, \quad t \in (0, T), \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha Q \frac{\partial u_b}{\partial x} + Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{1}{k} \frac{\partial w}{\partial t} - \rho_f \frac{\partial u^2 b}{\partial t^2} - \frac{\rho_f}{n} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad x \in \Omega_p, t \in (0, T), \quad (3.3)$$

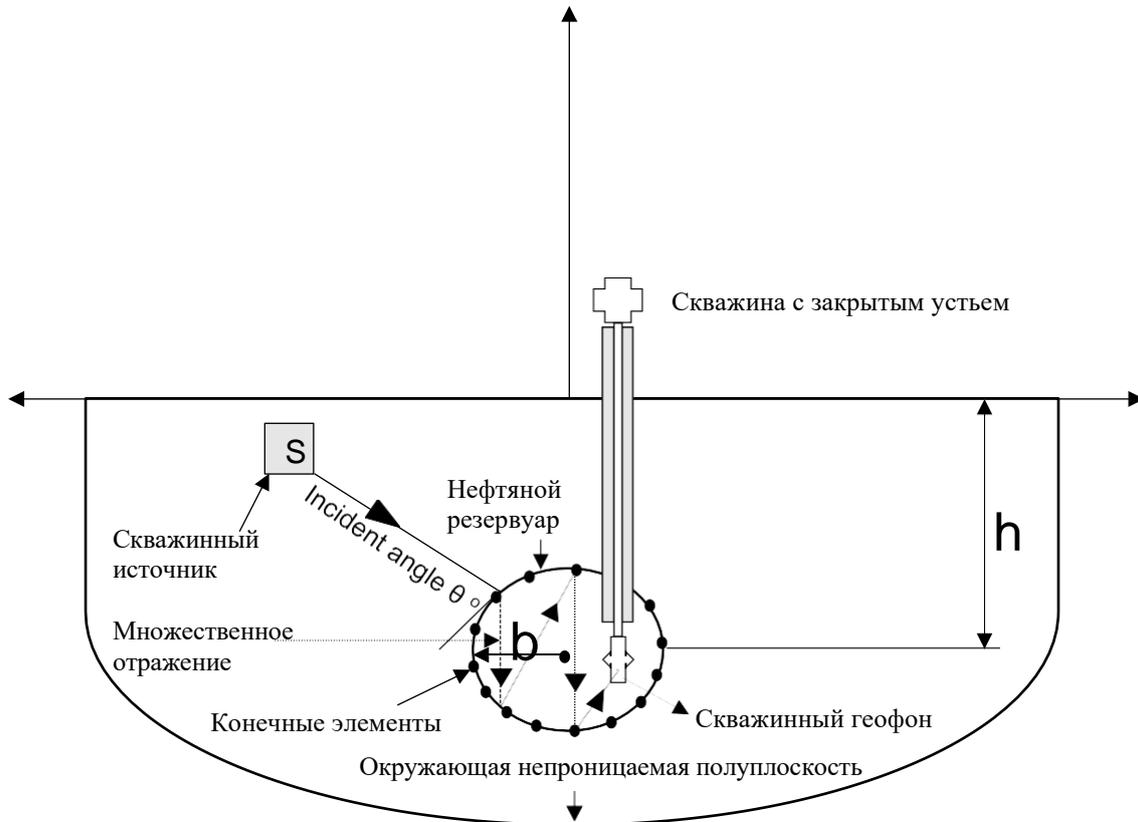


Рис. 3.1. Модель полуплоского нефтяного пласта, подвергающегося воздействию продольных волн

Количество порозластичных слоев обозначается индексом  $N_{pls}$ .  $T(s)$  определяет общую продолжительность воздействия сейсмических волн. Движение непроницаемых упругих твердых слоев обозначается  $ua(x, t)$ , а движение пороупругой матрицы горной породы выражается  $ub(x, t)$ . Относительное движение между матрицей породы и смещением поровой жидкости обозначается  $w(x, t)$ . Более того, базовые ЧДУ ограничены граничными условиями и интерфейсом усечения [16,41].

Граничное условие возбуждения сейсмических напряжений  $\sigma$  ( $\text{H}/\text{m}^2$ ) может быть выражено уравнением (3.4), а условие границы раздела усечения со скоростью продольной волны  $c$  может быть описано уравнением (3.5). Уравнение (3.6) описывает скорость продольной волны.

$$\left( (\lambda(0) + 2\mu(0)) \frac{\partial u_a}{\partial x}(0, t) \right) = -\sigma, \quad t \in (0, T), \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial x}(L, t) + \frac{1}{c(L)} \frac{\partial u_a}{\partial t}(L, t) = 0, \quad t \in (0, T), \quad (3.5)$$

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q}{\rho}} \quad (3.6)$$

Нулевые начальные условия также включены в основное уравнение волновой физики (3.7).

$$u_a(x, 0) = 0, \quad u_b(x, 0) = 0, \quad w(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial u_a}{\partial t}(x, 0) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u_b}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad x \in \Omega \quad (3.8)$$

уравнения (3.1), (3.2) и (3.3) были связаны на границе между упругим твердым пластом и пороупругим нефтяным пластом соответствующими начальными граничными условиями [17,42].

$$u_a|_{x_i^-} = u_b|_{x_i^+}, \quad i = p \quad u_a|_{x_i^+} = u_b|_{x_i^-}, \quad i = (p + Npls), \quad (3.9)$$

$$\left( (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^-} = \left( (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial u_b}{\partial x} + \alpha Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^+}, \quad i = p \quad (3.10)$$

$$\left( (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^+} = \left( (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial u_b}{\partial x} + \alpha Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^-}, \quad i = (p + Npls) \quad (3.11)$$

$$w|_{x_i} = 0, \quad i = p \quad \text{и} \quad i = (p + Npls) \quad (3.12)$$

Граничные условия непрерывности движения матрицы твердой породы и общего напряжения представлены уравнениями (3.9), (3.10) и (3.11). Незначительное относительное движение поровой жидкости на границах описывается уравнением (3.12), что эквивалентно условию нулевого потока  $(\partial p / \partial x) = 0$ . Критерии непрерывности движения и тяги применяются на границе между упругим твердым пластом и пороупругими горными породами [40].

$$u_a|_{x_i^-} = u_a|_{x_i^+}, \quad i = (2, \dots, (p - 1)) \quad \text{и} \quad ((p + Npls + 1), \dots, Nls), \quad (3.13)$$

$$\left( (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^-} = \left( (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^+}, \quad (3.14)$$

где  $(Nls)$  обозначает общее количество слоев пласта в системе. Критерии непрерывности применяются также между границами слоев пороупругого пласта.

$$u_b|_{x_i^-} = u_b|_{x_i^+}, \quad w|_{x_i^-} = w|_{x_i^+}, \quad i = (p - 1), \dots, (p + Npls - 1) \quad (3.15)$$

$$\left( (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial u_b}{\partial x} + \alpha Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^-} = \left( (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial u_b}{\partial x} + \alpha Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^+} \quad (3.16)$$

$$\left( \alpha Q \frac{\partial u_b}{\partial x} + Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^-} = \left( \alpha Q \frac{\partial u_b}{\partial x} + Q \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x_i^+} \quad (3.17)$$

Уравнение (3.15) изображает относительное движение поровой жидкости и матрицы породы. Уравнение (3.16) и уравнение (3.17) описывают непрерывность полного смещения напряжений и порового давления.

### 3.3 Численное моделирование

Соответствующие тестовые переменные  $s(x)$  и  $v(x)$ , пробные параметры (функции)  $u(x, t)$  и  $w(x, t)$ , а также их аппроксимации с использованием метода конечных элементов (МКЭ) применяются в численной модели [17,42].

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \Phi^T(x)u(t), w(x, t) = \psi^T(x)w(t) \\ s(x) &= s^T \Phi(x), v(x) = v^T \psi(x) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Из-за предположений о непрерывности моделей  $ua(x, t)$  и  $ub(x, t)$  объединяются, образуя  $u(x, t)$ . Для пространственной аппроксимации параметров испытания используются функции  $\Phi(x)$  и  $\psi(x)$ . Подход конечных элементов приводит к полудискретному выражению, зависящему от времени, для базовой волновой физики [17,42].

$$K_{uu}u + K_{uw}w + C_{uu} \frac{\partial u}{\partial t} + M_{uu} \frac{\partial u^2}{\partial t^2} + M_{uw} \frac{\partial w^2}{\partial t^2} = F_u \quad (19)$$

$$K_{wu}u + K_{ww}w + C_{ww} \frac{\partial u}{\partial t} + M_{wu} \frac{\partial u^2}{\partial t^2} + M_{ww} \frac{\partial w^2}{\partial t^2} = 0 \quad (20)$$

Элементы матриц могут быть описаны математическими выражениями следующим образом:

$$\begin{aligned} K_{uu} &= \int_{\Omega \setminus \Omega_p} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Phi^T}{\partial x} dx + \int_{\Omega_p} (\lambda + 2\mu + \alpha^2 Q) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Phi^T}{\partial x} dx, K_{uw} = \\ & \int_{\Omega_p} (\alpha Q) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \psi^T}{\partial x} dx \\ K_{wu} &= \int_{\Omega_p} (\alpha Q) \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \Phi^T}{\partial x} dx, K_{ww} = \int_{\Omega_p} Q \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi^T}{\partial x} dx, C_{uu} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{c} \Phi(L) \Phi(L)^T \\ C_{ww} &= \int_{\Omega_p} \frac{1}{k} \psi \psi^T dx, M_{uu} = \int_{\Omega} \rho \Phi \Phi^T dx, M_{uw} = \int_{\Omega} \rho_f \Phi \psi^T dx \\ M_{wu} &= \int_{\Omega} \rho_f \psi \Phi^T dx, M_{ww} = \int_{\Omega_p} \frac{\rho_f}{n} \psi \psi^T dx \end{aligned} \quad (21)$$

Зависящая от времени дискретная формулировка в уравнении (3.22) представляет собой комбинацию уравнений (3.19) и (3.20).

$$M \frac{\partial^2 st(t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial st(t)}{\partial t} + Kst(t) = f_{st} \quad (3.22)$$

Мы используем неявную схему метода Ньюмарка [43] для интегрирования по времени и вычисления полудискретного выражения уравнения (3.22). Решая уравнение (3.22) на каждом временном шаге и учитывая дискретные решения, вызванные возбуждением сейсмической волны, мы можем записать уравнение (3.23) [17,42].

$$\left[ M + C \frac{\Delta t}{2} + K \frac{(\Delta t)^2}{4} \right] \frac{\partial^2 st_{(i+1)}}{\partial t^2} = f_{st_{(i+1)}} - C \left[ \frac{\partial st_{(i)}}{\partial t} + \frac{\partial^2 st_{(i)}}{\partial t^2} \frac{\Delta t}{2} \right] - K \left[ st_{(i)} + \frac{\partial st_{(i)}}{\partial t} (\Delta t) + \frac{\partial^2 st_{(i)}}{\partial t^2} \frac{(\Delta t)^2}{4} \right] \quad (23)$$

Где  $(i)$  и  $(i + 1)$  представляют собой анализ узловых векторов на временных шагах  $i - \Delta t$  и  $(i + 1) - \Delta t$  соответственно, а  $\Delta t$  - интервал временного шага. Дискретизированное уравнение (3.23) было реализовано в MATLAB (2022b).

Сейсмические волны, распространяющиеся в неоднородных пористых средах, вызывают переток на границе раздела слоев с высокой и низкой проницаемостью, создавая перепад давления жидкости [23,26]. Поток жидкости, индуцированный волнами (ИВ), влияет на свойства передачи волн и, следовательно, на поведение коэффициентов отражения [44]. Основным заметный эффект заключается в том, что параметры отражения зависят от частоты, что называется дисперсией отражения. Понимание моделей пороупругого отражения, способных описывать характеристики коллектора, играет значительную роль в оценке влияния ИВ на характеристики коэффициента отражения в неоднородных породах-коллекторах [44].

В гетерогенных горных породах, где влияние затухания упругих волн и дисперсии скоростей становится все более значительным, крайне важно выявить характеристики пороупругого отражения. Ухудшение вязкости в частично насыщенных породах-коллекторах или полностью насыщенных гетерогенных породах происходит из-за внутреннего равновесия, которое возникает, когда жидкость перетекает из более упругих областей с высоким давлением в зоны со значительно низким давлением. Локальный поток можно классифицировать как мезоскопический или струйный поток на основе неоднородностей размера модели [28,40,45].

Сквиртовый поток обычно имеет место на микроскопическом уровне, но мезоскопический поток вызван неоднородностями в размере (масштабе), который значительно больше среднего диаметра пор, но короче

макроскопической длины волны [28,44-46]. В ультразвуковом диапазоне частот существенным является брызговой поток, в то время как мезоскопический поток широко рассматривается как основной механизм, вызывающий волновое затухание жидкости в сейсмическом диапазоне частот [28,46].

Что касается влияния локального потока на коэффициенты отражения, для изучения нефтеотдачи в нефтяном пласте используются комбинированная модель поперечного течения  $X_u$  и аналитическая формулировка Карционе мезоскопического течения в пороупругих средах [23,28,47]. Максимальную частоту затухания мезоскопического потока можно оценить по уравнению (3.24).

$$f_M \approx \kappa K_f / (\phi \eta t_o^2) \quad (3.24)$$

где  $M$  — распространение мезоскопических волн;  $k(md)$  — проницаемость породы;  $K_f$  (ГПа) — модуль объемного сжатия жидкости;  $\eta$ (ср) — вязкость жидкости;  $\phi$ (%) — пористость породы; и  $t_o(m)$  — размер патчей. Максимальную частоту затухания брызгового потока можно рассчитать по формуле [28,47].

$$f_{SF} \approx (z/R)^2 K_f / \eta \quad (3.25)$$

где  $SF$  — поток струи;  $z(m)$  — толщина трещины;  $R(m)$  — длина трещины;  $z/R$  — отношение толщины трещины к длине трещины в пористой среде;  $K_f$ (ГПа) — модуль объемного сжатия жидкости;  $\eta$ (ср) — вязкость жидкости [28].

Упрощенный прототип двухслойного пласта был исследован для эффективной оценки количества перетоков в неоднородном нефтяном пласте заводнения (рис. 3.2) [23,28]. Уравнения системы управляют как потоком жидкости, так и смещением горных пород, вызванным сейсмическим возбуждением. Задачи могут быть решены для упрощения пластовых условий, чтобы оценить потенциал МУН нефти в зоне низкой проницаемости. Мы ориентируемся на обобщенную модель, в которой высокопроницаемый пласт приближается к заводнению остаточной нефтенасыщенности ( $S_{orw}$ ), а низкопроницаемый пласт имеет уровень нефтенасыщенности, близкий к начальной нефтенасыщенности ( $S_{oi}$ ), (больше  $S_{orw}$ ) [23]. Для простоты будем считать, что ( $S_{o1}$ ) и ( $S_{o2}$ ) постоянны и при возбуждении сейсмических волн закачка воды отсутствует. Сейсмические колебания передаются в область пласта вертикально и равномерно в направлении  $x$ . Сейсмическая нагрузка, которая создает поток жидкости в двухслойной модели, является нормальным напряжением. Согласно модели перетока между двумя слоями коллектора, скорость изменения нефтенасыщенности из-за перетока между слоями может быть записана в уравнении (26) [23].

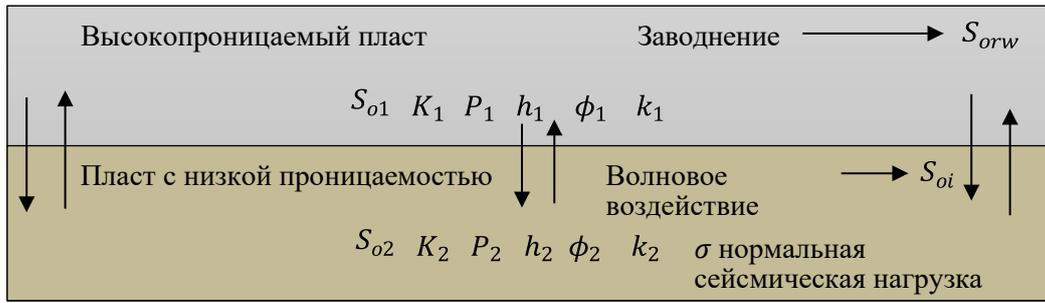


Рис. 3.2 - Иллюстрирует модифицированный прототип двухслойного пласта с использованием волны нормального напряжения ( $\sigma$ ) [23, 40]

$$\frac{\partial S_{oi}}{\partial t} = \left( \frac{\sigma_a \omega}{\phi_1} \right) \left[ \frac{iD_o \left( \frac{A_2}{M_1} - \frac{A_1}{M_2} \right)}{h_1} \right] e^{i\omega t} \quad (3.26)$$

$$A = \phi \left( \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} \right) + \frac{1}{M} \quad (3.27)$$

$$D_T = \frac{2}{\frac{2h_v}{\lambda_{Tv}} + \frac{h_1}{\lambda_{T1}} + \frac{h_2}{\lambda_{T2}}}, \quad D_o = \frac{2}{\frac{2h_v}{\lambda_{ov}} + \frac{h_1}{\lambda_{O1}} + \frac{h_2}{\lambda_{O2}}} \quad (3.28)$$

где  $h_1$  – толщина слоя 1;  $h_2$  – толщина слоя 2;  $h_v$  — толщина тонкой кожицы между двумя слоями;  $\lambda_{T1}$  — общая подвижность слоя 1;  $\lambda_{T2}$  — полная подвижность слоя 2;  $\lambda_{O1}$  — подвижность нефтяной фазы слоя 1;  $\lambda_{O2}$  — подвижность нефтяной фазы слоя 2;  $\lambda_{Tv}$  — общая подвижность тонкой кожи;  $\lambda_{ov}$  — подвижность масляной фазы тонкой кожи;  $A_1$  и  $A_2$  — эффективная сжимаемость слоя 1 и слоя 2;  $D_T$  — эффективная общая пропускаемость;  $D_o$  — эффективная проводимость масла между двумя слоями;  $M_1$  — модуль горной породы слоя 1;  $M_2$  — модуль породы слоя 2;  $S_{w1}$  — водонасыщенность слоя 1;  $S_{w2}$  — водонасыщенность слоя 2;  $S_{o1}$  — нефтенасыщенность слоя 1;  $S_{o2}$  — нефтенасыщенность пласта 2;  $\phi_1$  — пористость слоя 1,  $\phi_2$  — пористость слоя 2.

### 3.4 Численный эксперимент

В модели полуплоскости мы рассматриваем круговое геометрическое представление нефтяного пласта. Источник возбуждения находится в полуплоскости среды (рис. 3.1) [28]. Орбитальные вибраторы (источники) могут индуцировать волны сжатия (P) и сдвига (SH и SV) с амплитудами и частотами, которые можно оптимизировать для улучшения потока жидкости через пористую среду [48]. Пористость и проницаемость пористой среды служат основными определяющими факторами того, как будет характеризоваться гидродинамика [49]. Согласно обзору литературы, на жидкостную систему существенно влияют такие явления, как микровращение, пористая среда и вязкоупругая жидкость [50]. Поведение и движение молекул и частиц жидкости

через насадочные слои, перфорированные пластины и фильтрующие листы изучаются с использованием модели пористой среды [51]. Окружающий слой в полуплоскости представляет собой непроницаемое упругое горное образование. Высокопроницаемые и низкопроницаемые пласты, оба из которых представляют собой флюидонасыщенные пористые и проницаемые горные породы, имеют одинаковую толщину в неоднородном нефтяном коллекторе (Рисунок 3.2). Мы фокусируемся на влиянии сейсмического (Р-волны) возбуждения на мгновенную скорость переноса нефти в зрелом нефтяном пласте. Мы предполагаем, что операция заводнения в высокопроницаемом пласте 1 вытеснила большую часть нефти от начальной нефтенасыщенности ( $S_{oi}$ ) до остаточной нефтенасыщенности при заводнении ( $S_{orw}$ ) и обошла нефть в низкопроницаемом пласте 2 с нефтенасыщенностью ( $S_{o2}$ ), ближе к начальной нефтенасыщенности ( $S_{oi}$ ). Скин-эффект между слоями пласта незначителен. Непроницаемый и порозластичный слои дискретизируются с помощью квадратичного элемента. При прямолинейном возбуждении период наблюдения длится 10 секунд. Мы подтвердили результаты численной порозластичной модели с помощью упругой модели [17,42]. Свойства флюида и породы, использованные в численном исследовании, представлены в таблице 3.1 [17,28].

Таблица 3.1

Свойства используемой жидкости и породы

Показатели	Символическое обозначение	Величина	Единица
Плотность пластового рассола	$\rho_w$	1050	Кг/м <sup>3</sup>
Плотность нефти	$\rho_o$	860	Кг/м <sup>3</sup>
Плотность порозластичного твердого тела	$\rho_p$	1770	Кг/м <sup>3</sup>
Плотность упругого твердого тела	$\rho_s$	2000	Кг/м <sup>3</sup>
Модуль объемной деформации осушенного твердого слоя 1	$K_1$	$3.9 \times 10^9$	Н/м <sup>2</sup>
Модуль объемной деформации осушенного твердого слоя 2	$K_2$	$6.0 \times 10^9$	Н/м <sup>2</sup>
Модуль объемной деформации недренированного твердого слоя 1	$K_{d1}$	$5.0 \times 10^9$	Н/м <sup>2</sup>
Объемный модуль недренированного твердого слоя 2	$K_{d2}$	$3.5 \times 10^9$	Н/м <sup>2</sup>
Объемный модуль пластичности Рассол	$K_b$	$3.0 \times 10^9$	Н/м <sup>2</sup>
Объемный модуль масла	$K_o$	$6.7 \times 10^8$	Н/м <sup>2</sup>
Вязкость пластового рассола	$\mu_w$	$1.0 \times 10^{-3}$	Нс/м <sup>2</sup>

Вязкость нефти	$\mu_0$	$5.0 \times 10^{-3}$	Нс/м <sup>2</sup>
Сейсмические напряжения	$\sigma$	10	Нс/м <sup>2</sup>
Проницаемость слоя 1	$k_1$	$4.44 \times 10^{-13}$	м <sup>2</sup>
Проницаемость слоя 2	$k_2$	$1.97 \times 10^{-13}$	м <sup>2</sup>
Подвижность жидкости в слое 1	$\lambda_1$	$1.45 \times 10^{-10}$	м <sup>3</sup> с/кг
Подвижность жидкости в слое 2	$\lambda_2$	$3.94 \times 10^{-11}$	м <sup>3</sup> с/кг
Неснижаемая водонасыщенность	$S_{wi}$	0.2	%
Толщина пласта	$t$	100	м
Толщина зоны высокой проницаемости	$h_1$	50	м
Толщина зоны низкой проницаемости	$h_2$	50	м
Частота возбуждения	$f$	3.0	Гц

### 3.4 Результаты и обсуждения

#### 3.4.1 Вертикальное смещение

В этом разделе представлены результаты вертикального смещения (матрицы породы и флюида) в области низкой проницаемости неоднородного нефтяного пласта. Влияние радиуса наблюдения ( $r_o$ ) на амплитуды смещения жидкой и твердой матрицы в пороупругой модели оценивается как функция времени. Радиус ствола скважины ( $r_w$ ) составляет 0,06 м, а радиус нефтяного пласта ( $b$ ) — 500 м.

##### 3.4.1.1 Влияние радиуса наблюдения [38]

На радиусе наблюдения 50 м было замечено, что амплитуда смещения жидкости очень быстро уменьшалась со временем наблюдения. Так как импульс жидкости очень быстро затухает (экспоненциальное затухание) из-за извилистости порового пространства породы-коллектора. В принципе, диффузия давления определяет распространение волн давления жидкости; по мере увеличения вязкости или сжимаемости жидкости и/или снижения проницаемости дисперсия увеличивается, а амплитуда вытеснения жидкости уменьшается более резко (рис. 3.3) [42]. Распространение колебаний жидкости через поровое пространство значительно ослаблено из-за извилистости порового пространства, в то время как распространение упругих смещений матрицы породы внутри породы-коллектора оказывается более значительным (Рисунок 3.4) [40]. Когда сейсмическая вибрация передается с использованием скважинной технологии, поверхность породы-коллектора сжимается, и

смещение распространяется по матрице породы-коллектора, стимулируя как матрицу, так и поровую жидкость. Развитие вертикальных смещений с течением времени показано на рисунке 3.4.

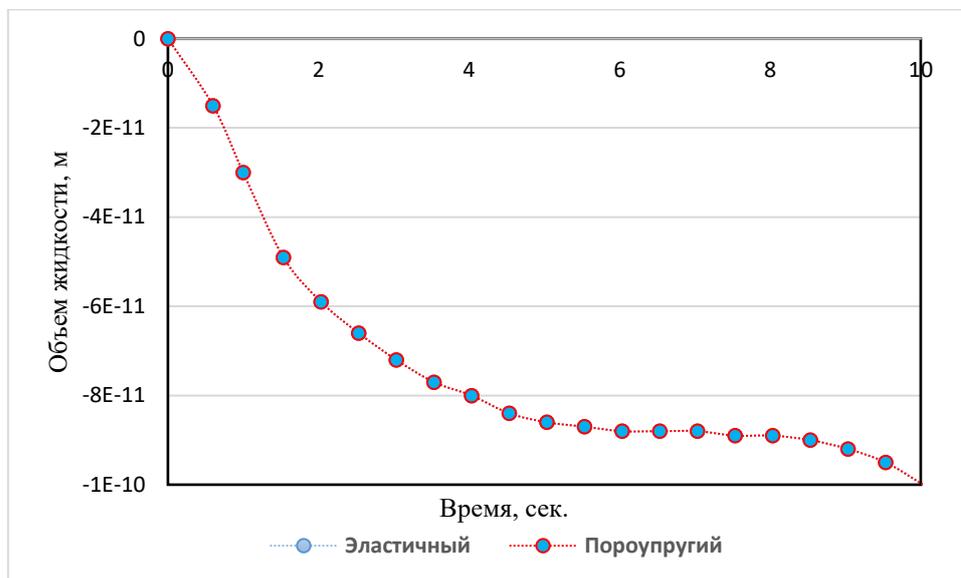


Рис. 3.3 - Иллюстрирует поля смещений колебаний поровой жидкости

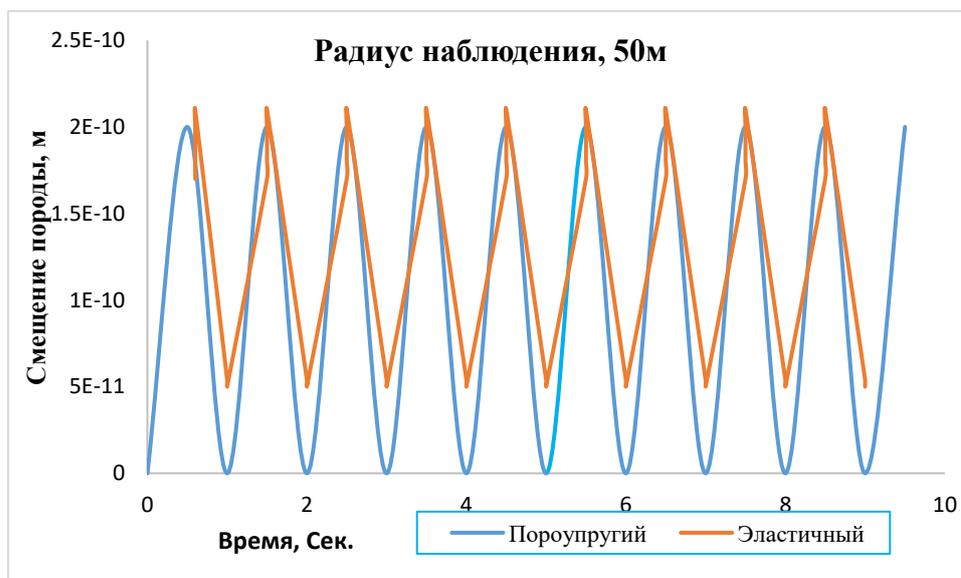


Рис. 3.4 - Иллюстрирует поля смещений колебаний матрицы горных пород

Сейсмическое напряжение создает волну сжатия, которая проходит вертикально через слои нефтяного резервуара. Эта волна сжатия несколько раз с перерывами отражается в нефтяном пласте в течение периода наблюдения 10 секунд, и скважинные геофоны регистрируют амплитуды смещения жидкости и матрицы породы. Таким образом, амплитуда смещения матрицы демонстрирует устойчивый зигзагообразный характер смещения [52,53]. Состояние пласта и

величина стресс-волновой нагрузки определяют амплитуду смещения. Показано, что амплитуда смещения порового флюида (рис. 3.3) меньше величины смещения матрицы породы (рис. 3.4) на том же радиусе наблюдения. Величина смещения поровой жидкости уменьшалась по слегка линейному закону затухания при увеличении радиуса наблюдения до 100 м по направлению к границе пласта (Рисунок 3.5). Показано, что затухание амплитуды смещений происходит медленнее на радиусах наблюдения 50 м, чем на 100 м. Поскольку распределение вытеснения жидкости в пласте является диффузионным, величина колебаний жидкости уменьшается по мере удаления от ствола скважины, что в основном определяется коэффициентом диффузии давления. Чем выше сжимаемость поровых флюидов, тем меньше амплитуда смещения флюидов. Вертикальное смещение матрицы породы увеличилось по мере увеличения радиуса наблюдения за резервуаром до 100 м (Рисунок 3.6) [40].

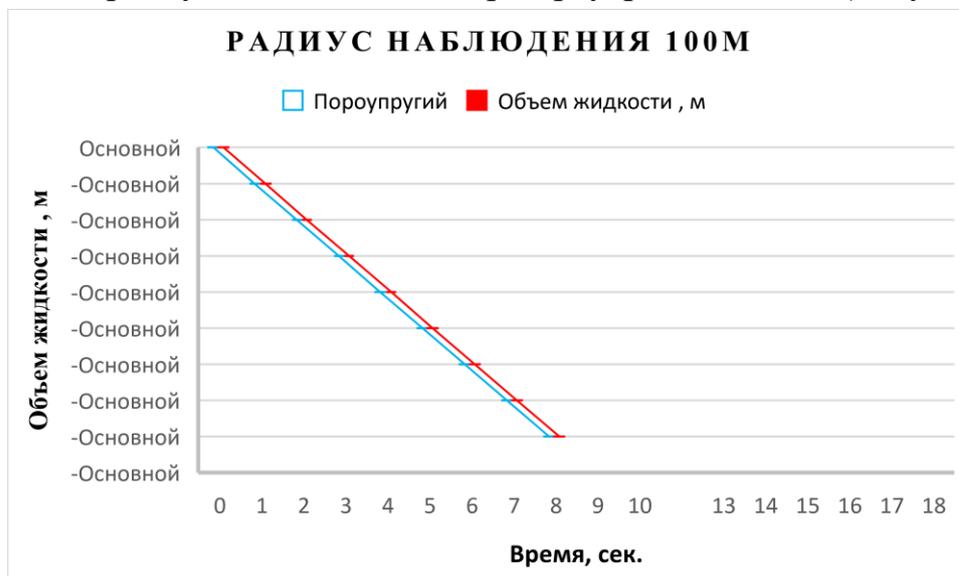


Рис. 3.5 - Иллюстрирует поля смещений колебаний поровой жидкости

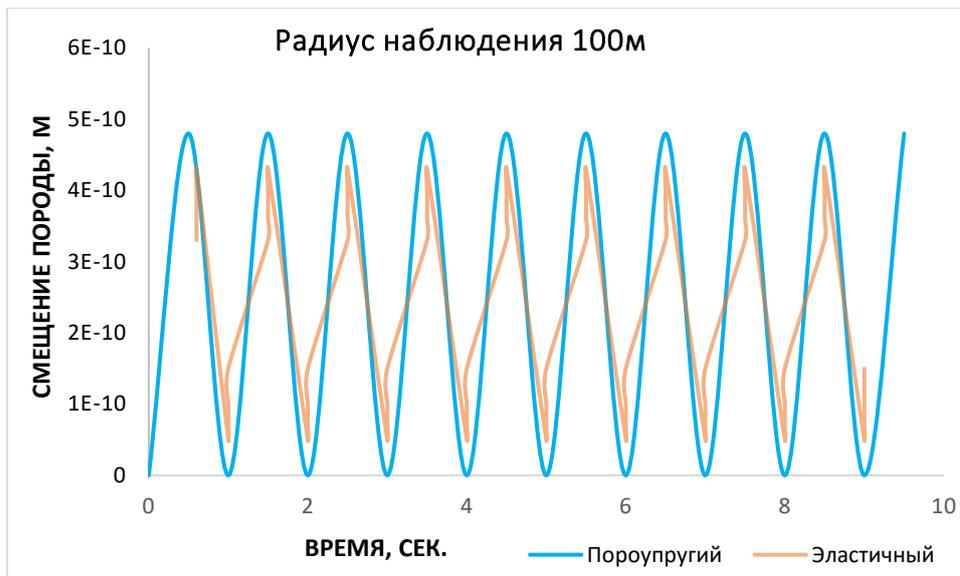


Рис. 3.6 - Иллюстрирует поля смещений колебаний матрицы горных пород.

Вертикальное смещение матрицы породы сохраняет зигзагообразную тенденцию смещения на протяжении всего периода наблюдений. Амплитуда смещения в двухфазных условиях больше, чем в одиночных случаях, поскольку сигналы сейсмической частоты могут отражать долгосрочное поведение. Наблюдается увеличение смещения матрицы породы по мере приближения радиуса наблюдения к границе пласта и удаления от радиуса ствола скважины. Волна напряжений, передаваемая твердому скелету, гораздо эффективнее передается поровым флюидам в многофазном состоянии, тогда как влияние, вызванное контактом жидкость-жидкость, относительно невелико, чтобы его можно было учитывать. Амплитуда смещения поровой жидкости уменьшалась линейно по прямолинейному тренду при увеличении радиуса наблюдения до 200 м, как показано на рисунке 3.7.

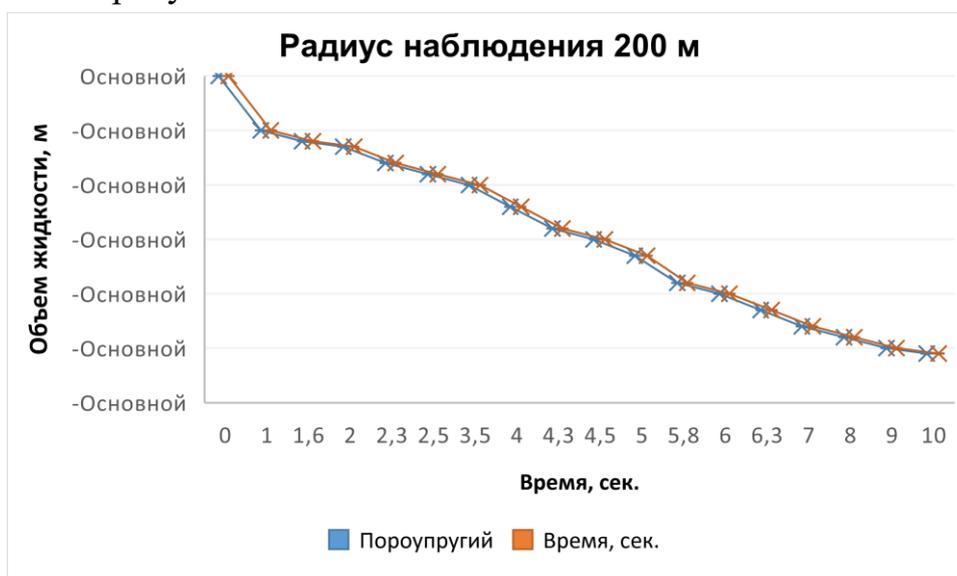


Рис. 3.7 - Иллюстрирует поля смещений колебаний поровой жидкости.

Это связано с большей сжимаемостью пласта по мере приближения радиуса к границе нефтяного пласта. Смещение матрицы породы увеличивалось зигзагообразно по мере увеличения радиуса наблюдения на 200 м по мере приближения к границе нефтяного пласта (Рисунок 3.8). Результаты показали, что диффузия колебаний вытеснения флюида во временной области через поровое пространство сильно ослаблена и что распространение смещения матрицы породы в области с низкой проницаемостью может быть более эффективным во время перетока в гетерогенном коллекторе. Пористость слоя с низкой проницаемостью  $\phi_2$ , диаметр участков  $d$  и соотношение сторон  $h/R$  считались равными 0,23%, 0,2 м и 0,001 соответственно.

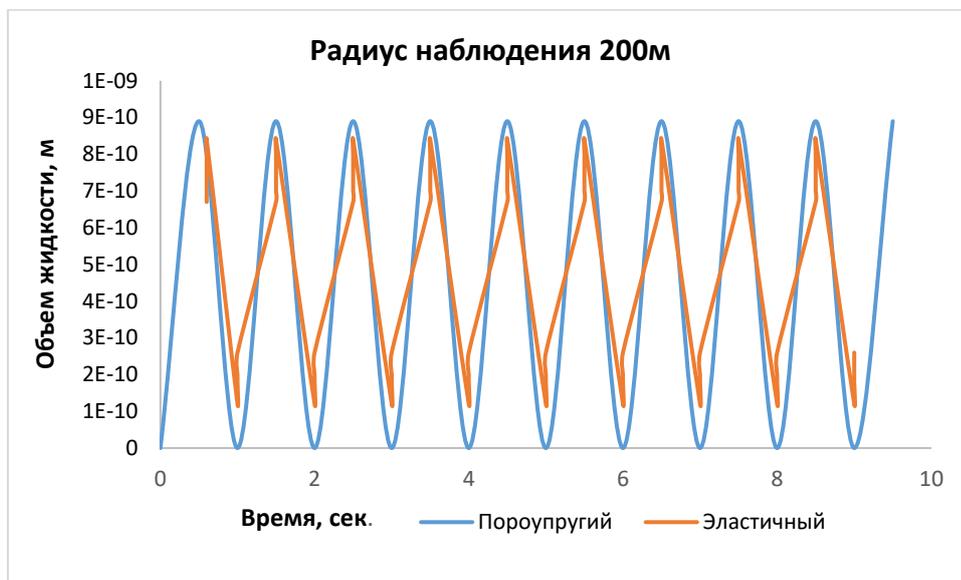


Рис. 3.8 - Иллюстрирует поля смещений колебаний твердых пород.

Прогнозируемые результаты затухания для мезоскопической частоты потока ( $fm$ ) и частоты впрыскивающего потока ( $fsf$ ) составляют 3,0 Гц и  $fSF=3,0$  МГц соответственно. Процесс затухания в низкопроницаемом слое неоднородного нефтяного пласта носит мезоскопический характер, тогда как частота затухания пика потока брызг находится за пределами сейсмического диапазона частот (ультразвука). Наконец, было продемонстрировано, что захваченная нефть, обойденная фазой заводнения и, тем не менее, остающаяся в низкопроницаемой области неоднородного нефтяного пласта, может быть вытеснена в высокопроницаемую область за счет сейсмического перетока. На рисунке 3.9 показан прогноз переходного изменения нефтенасыщенности, вызванного перетоком между слоями нефтяного пласта. Переток при мезоскопической частоте затухания 3,0 Гц продемонстрировал мгновенную

скорость переноса нефти (коэффициент извлечения) обходной нефти сейсмическими волнами 2,5% (Рисунок 3.9).

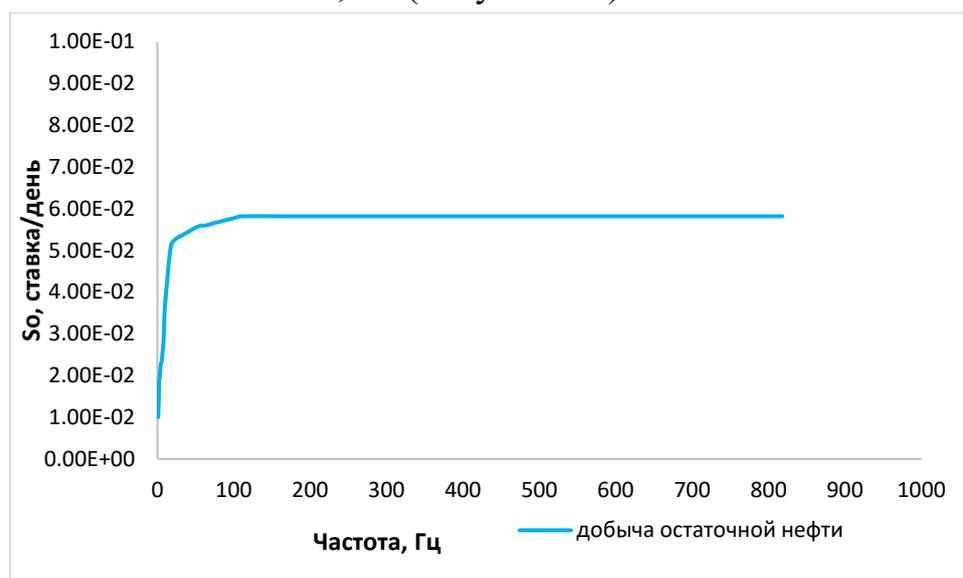


Рис. 3.9 - Скорость переноса нефти внутри двух пластов (в масштабе  $\sigma a$ ) с точки зрения мезоскопической частоты и комбинации нефтенасыщенностей.

Мезоскопическую частоту можно использовать для мониторинга скорости извлечения отпущенной нефти в пласте при сейсмическом воздействии при различных сочетаниях насыщенности пластов пласта. Сейсмическое возбуждение также можно комбинировать с заводнением для извлечения большего количества нефти как из областей с высокой [40], так и из областей с низкой проницаемостью. Реакция вытеснения поровой жидкости в низкопроницаемом слое очень быстро затухает по мере прохождения сейсмической волны через неоднородный нефтяной пласт, в то время как матричное смещение эффективно распространяется и поддерживает переток через слои и, возможно, вытесняет нефть из низкопроницаемого пласта в ствол скважины [54].

### Вывод

В данном разделе исследуется использование скважинного сейсмического источника в модели полуплоскости для анализа характеристик распространения упругих волн в низкопроницаемом и неоднородном нефтяном пласте. Было обнаружено, что по мере приближения радиуса наблюдения к границе нефтяного пласта, величина смещения матрицы породы демонстрирует тенденцию к увеличению волновой энергии по сравнению с амплитудой смещения флюида в зоне низкой проницаемости. Смещение матрицы породы во временной области способствует перетоку внутри слоев пласта, что может способствовать

вытеснению нефти из матрицы породы. Мгновенный перенос нефти может быть увеличен (дебит до 2,5 % в сутки) на мезоскопической частоте 3,0 Гц за счет усиления выноса остаточной нефти, вызванного перетоком на границе низкопроницаемой зоны, который может быть улучшен методом заводнения. Использование МУН с сейсмическими волнами в сочетании с заводнением позволяет добывать больше нефти как в низко-, так и в высокопроницаемых зонах зрелого нефтяного пласта. Таким образом, пиковая мезоскопическая частота может служить одним из критериев для оценки эффективности извлечения нефти из неоднородных нефтяных коллекторов.

### 3.5 Расчёты акустического воздействия на призабойную зону скважины

Мощный ультразвук, как развивающаяся зеленая технология, привлекает все большее внимание нефтяной промышленности. Физические и химические эффекты периодических колебаний и взрыва акустических кавитационных пузырьков могут использоваться для выполнения множества функций. Здесь представлены механизмы и эффекты акустической кавитации. Кроме того, подробно обсуждаются применения мощного ультразвука в нефтяной промышленности, включая повышение нефтеотдачи, предотвращения образования АСПО, повышения давления, деэмульгацию, снижение вязкости, с точки зрения промышленного фона обсуждаются ключевая проблема и механизм решения, текущие приложения и будущее развитие мощного ультразвука.

В таблицах 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5 представлено исходные данные в целом для расчета УЗ.

Таблица 3.2

Исходные данные для расчета УЗ

№ п/п	Показатели	Символическое обозначение	Величина
1	Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{ж}$	841,063
2	Глубина скважин, м	H	1300,6
3	Сжимаемость жидкостей, (м <sup>2</sup> /н) <sup>-1</sup>	$\beta$	$4,82 \cdot 10^{-10}$
4	Первоначальный и конечный радиусы полостей, м	$R_0/R$	20
5	Радиус пузырька перед захлопыванием, м	R	-
6	Первоначальный радиус пузырька в м	$R_0$	-
7	Частотой колебаний, Гц	f	14000
8	Средне скорость распространения звука в среде, м/с	C	2239
9	Плотность песчаники, кг /м <sup>3</sup>	$\rho_1$	2500
10	модуль Юнга для песчаников, н/м <sup>2</sup>		
11	Плотность вода, кг /м <sup>3</sup>	$\rho_в$	1000

Продолжение табл. 3.2

12	Средне отношение удельтных теплоемкостей при температуре 20 °С для газа	$\chi$	1,4
13	Плотность газ, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{г}$	755
14	Звуковое давление на пороге слышимости, Па	$P_{зв}$	$2 \cdot 10^{-5}$
15	Звуковое давление, Па	$P_{д}$	2
16	Плотности пароды, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{п}$	2428
17	Величины амплитуды звуковго давления, Па	$P_{1m}$	24516,6
18	Скорость продольных волн, км/с	$c$	3,4
19	Константа	$f_2$	1,5
20	Амплитуда источника колебаний	$A_0$	1
21	Расстояние от источника колебаний до точки, в которой определяется амплитуда, м	$X$	8
22	Показатель степени, $n = 0$ для плоской волны, $n = 0,5$ для цилиндрической волны и $n = 1$ для сферической волны	$n$	0,5
	интенсивность падающей волны, Вт/м <sup>2</sup>	$I_0$	$7.112 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3.3

Скорость звука в газах и жидкостях (при температуре 20°С)

Наименование газа или жидкости	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука $c$ , м/с	Акустическое сопротивление $\rho c$ , кг/м <sup>2</sup> с
Водород	0,084	1310	110
Гелий	0,167	1005	168
Кислород	1,34	326	437
Азот	1,17	337	394
Окись углерода	1,17	350	410
Углекислый газ	1,85	268	496
Воздух	1,21	344	416
Водяной пар (130°С)	0,54	450	243
Бензин	750	1190	$89 \cdot 10^4$
Вода дистиллированная	1000	1492	$149 \cdot 10^4$
Глицерин	1260	1950	$246 \cdot 10^4$
Кислота соляная	908	1500	$136 \cdot 10^4$
Толуол	866	1325	$115 \cdot 10^4$

Таблица 3.4

## Акустические параметры пород и флюидов

Порода, флюид	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_P$ , v/c	$V_S$ , м/с	Коэффициент поглощения $\theta$ , м <sup>-1</sup>		Удельное волновое сопротивление $Z \cdot 10^{-5}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
				Продольная волна $\theta_P$	Поперечная волна $\theta_S$	
Гранит	2710	5100	2690	0,130	0,22	-
Песчаник	2500	3500	1865	0,264	1,09	-
Алевролит	2600	1610	-	-	-	42,0
Известняк	2300-3000	3200-5500	-	-	-	73÷165
Лед	918	3200-3300	-	-	-	-
Вода	1000	1485	Нет	-	Нет	-
Воздух	1,29	331	Нет	-	Нет	-
Нефть	800-950	1300-1400	Нет	$\theta_{\text{Нефть}}/\theta_{\text{вода}} \sim 2-$ 5,8 (f~20- 90кГц)	Нет	-
Метан	0,7*	500	Нет	-	-	-

Таблица 3.5

## Модули Юнга горных пород нефтяных месторождений Волго-Уральской области, определенные методом вдавливания штампа

Породы	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-4}$ , МПа
Алевролиты кварцевые	0,56 – 0,83
Известняки пелитоморфные (глинистые)	2,0
Доломиты мелкозернистые	4,37
Аргиллиты	0,55
Песчаники кварцевые мелкозернистые	0,24 – 0,47
Песчаники кварцевые среднезернистые	1,76
Песчаники кварцевые крупнозернистые	1,08 – 1,3

Величину давления во фронте волны, возникающей при уменьшении радиуса вакуумной сферической полости в жидкости, можно рассчитать по формуле

$$p := \sqrt{\frac{2P_0}{3\beta} \cdot [(20)^3 - 1]} \quad (3.29)$$

Где  $\beta$  – сжимаемость жидкостей в  $(\text{м}^2/\text{н})^{-1}$ ;

$P_0$  – давление в жидкости в  $\text{н}/\text{м}^2$ .

$R_0$  и  $R$  - первоначальный и конечный радиусы полостей в м.

Сущность эффекта заключается в том, что при ударных нагрузках гетерогенной системы давление за фронтом волн может во много раз превышать инициируемые первоначальные давления (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Величину давления во фронте волны

Максимальное значение мгновенного давления получается на расстоянии  $1,57 R_0$  от центра захлопнувшегося пузыря.

Время, в течение которого полностью смыкается газовый пузырек радиус  $R_0$  в жидкости, равно (по Рэлею)

$$\tau := 0.915 \cdot R_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{P_0}} \quad (3.30)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $P_0$  – гидростатическое давление в  $\text{н}/\text{м}^2$ .

Про нормальное атмосферное давление для смыкания газового пузырька диаметром 300 мкм требуется время 15 мксек.

Как известно, наиболее распространенной теорией, которая дает аналитическое выражение силы механических ударов захлопывающихся кавитационных пузырьков, является теория Рэлея.

Давление, развиваемое при этом, определяют по формуле:

$$P := 0.163 \cdot \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 \cdot P_0 \quad (3.31)$$

$P_0$  – гидростатическое давление в н/м<sup>2</sup>;

$R$  – радиус пузырька перед захлопыванием в м;

$R_0$  – первоначальный радиус пузырька в м.

В связи с содержанием в этой главе данных ноу-хау, часть данных была скрыта от общего доступа.

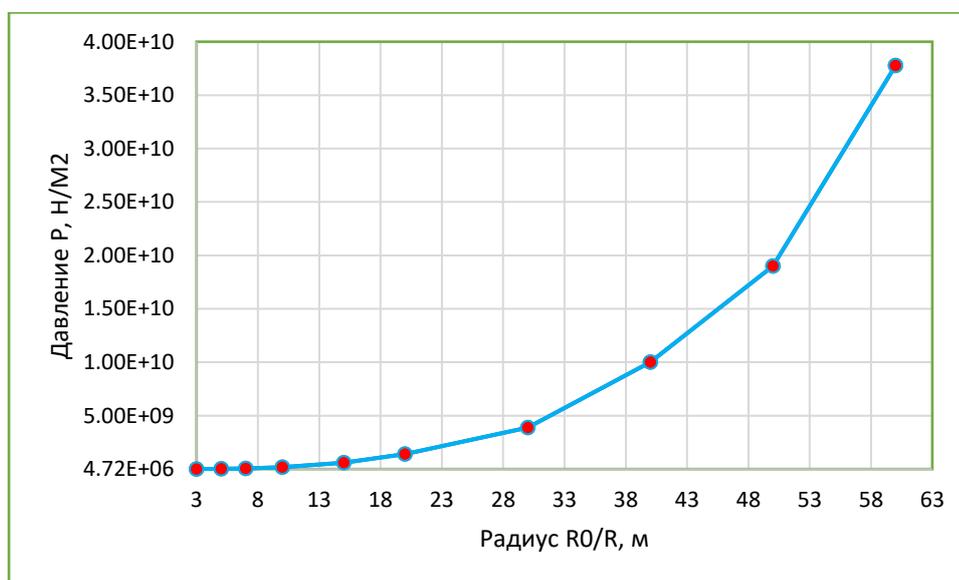


Рисунок 3.11 – Давление, развиваемое взвесности от отношения  $R_0/R = (3,8,13,18,23, 60)$

Из таблицы видно, что давления, возникающие при захлопывании кавитационной полости, могут достигать значений в десятки тысяч н/м<sup>2</sup>.

Как показал анализ кинограмм ускоренной киносъемки работы гидродинамического излучателя для щелевой кавитации при расстоянии от щели до пластины менее 0,1 мм, максимальное отношение  $R_0/R = 5$  и, согласно теории Рэлея, развиваемое давление при этом будет около 1,2 Мн/м<sup>3</sup>. Для срывной кавитации, развивающейся за пластинкой, при  $h = 0.5 / 1$  мм максимальное отношение  $R_0/R = 60$ , а развиваемое давление достигает 1000,0 Мн/м<sup>2</sup> (10 000 кг/см<sup>2</sup>).

Скорость распространения звука связана с длиной волны  $\lambda$  и частотой колебаний  $f$  соотношением

$$C := \lambda \cdot f \quad (3.32)$$

Таблица 3.6

Результаты расчета скорости звука в пласте

Материал	Средней значения скорость звука, м/с
Порода, $C_{\text{тве}}$	$4,765 \cdot 10^3$
Жидкость, $C_{\text{ж}}$	$1,505 \cdot 10^3$
Газ, $C_{\text{газ}}$	445,987
Средняя скорость распространения звука в среде, $C_{\text{общ}}$	$2.239,10^3$

В связи с содержанием в этой главе данных ноу-хау, часть данных была скрыта от общего доступа.

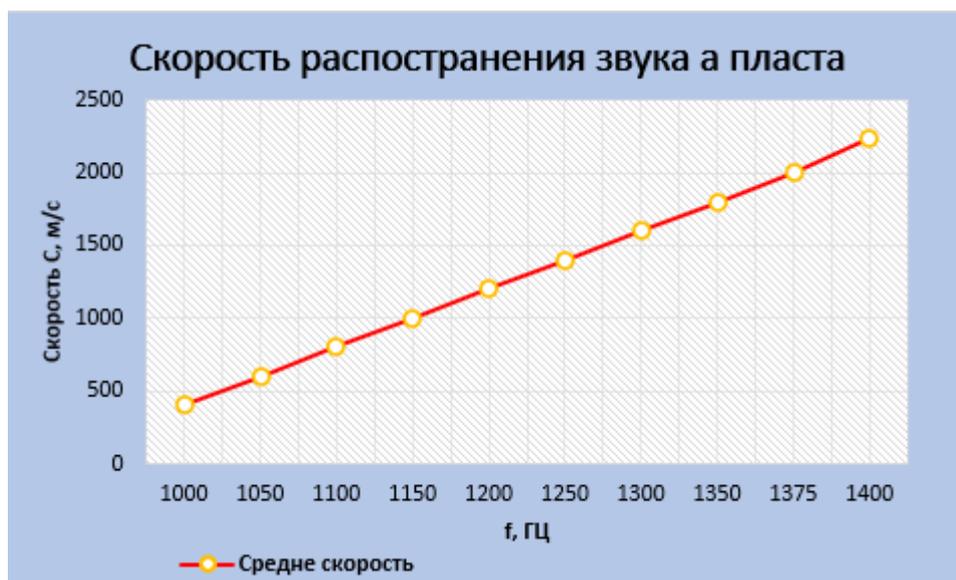


Рисунок 3.12 – Скорость распространения звука в пласте

Сила звука  $J$  определяется по формула

$$J := \frac{P_y}{C_{\text{общ}} \cdot \rho_0} \quad (3.33)$$

$P_y$  - мгновенное значение избыточного или звукового давления

$c$  — скорость распространения звука в среде, м/с;

$\rho_0$  — плотность среды распространения звука, кг/м<sup>3</sup>.

$$J_1 := \frac{P_d}{C_{\text{общ}} \cdot \rho_{\text{ср}}} = 7.112 \times 10^{-7} \text{ вт/м}^2$$

Эффективное значение  $P_{\text{эфф}}$  находится делением величины амплитуды звукового давления  $P_{1m}$  на  $\sqrt{2}$

$$P_{\text{эфф}} := \frac{P_{1m}}{\sqrt{2}} \quad (3.34)$$

$P_{1m}$  - величины амплитуды звукового давления выражается в Паскалях (Па).

$$P_{1m} := P_1 \cdot 1.414 = 4.87 \times 10^9$$

Распространяющиеся в любой среде упругие волны испытывают поглощение, обусловленное вязкостью (силами внутреннего трения), теплопроводностью, а на высоких частотах и молекулярным поглощением в среде. При этом энергия звуковых волн переходит в тепловую энергию. Кроме поглощения наблюдается рассеяние звуковой энергии на упругих неоднородностях в среде, при этом рассеяние звука существенно возрастает при размерах неоднородностей, соизмеримых с длиной звуковой волны.

Поглощение упругих колебаний

Оценка изменения амплитуды сигналов при распространении акустических волн по пласту и в массиве пласта в следующем виде:

$$A_{x1} := P_0 \cdot 10^{n \cdot x} \cdot e^{-\alpha \cdot 10 \cdot x} \quad (3.35)$$

где  $A_x$  – амплитуда акустической волны на расстоянии  $x$  от источника колебаний;

$A_0$  – амплитуда источника колебаний;

$x$  – расстояние от источника колебаний до точки, в которой определяется амплитуда в м;

$\alpha$  – коэффициент затухания акустического излучения в среде;

$n$  – показатель степени,  $n = 0$  для плоской волны,  $n = 0,5$  для цилиндрической волны и  $n = 1$  для сферической волны.

$$A_{x1} := P_0 \cdot 10^n \cdot e^{-\alpha \cdot 10} = 0.628 \text{ m}$$

$$A_{x2} := P_0 \cdot 50^n \cdot e^{-\alpha \cdot 50} = 0.035 \text{ m}$$

$$A_{x3} := P_0 \cdot 100^n \cdot e^{-\alpha \cdot 100} = 0 \text{ m}$$

$$A_{x4} := 1 \cdot 10^n \cdot e^{-\alpha \cdot 10} = 1.255$$

$$A_{x5} := 1 \cdot 50^n \cdot e^{-\alpha \cdot 50} = 0.07$$

$$A_{x6} := 1 \cdot 100^n \cdot e^{-\alpha \cdot 100} = 0.001$$

На рис. (3.13) представлены зависимости распределения амплитуд колебаний от частоты для различных перфорационных отверстий. Относительная амплитуда колебаний характеризуется отношением амплитуды колебаний в обсадной колонне к амплитуде колебаний на выходе из звукового генератора.

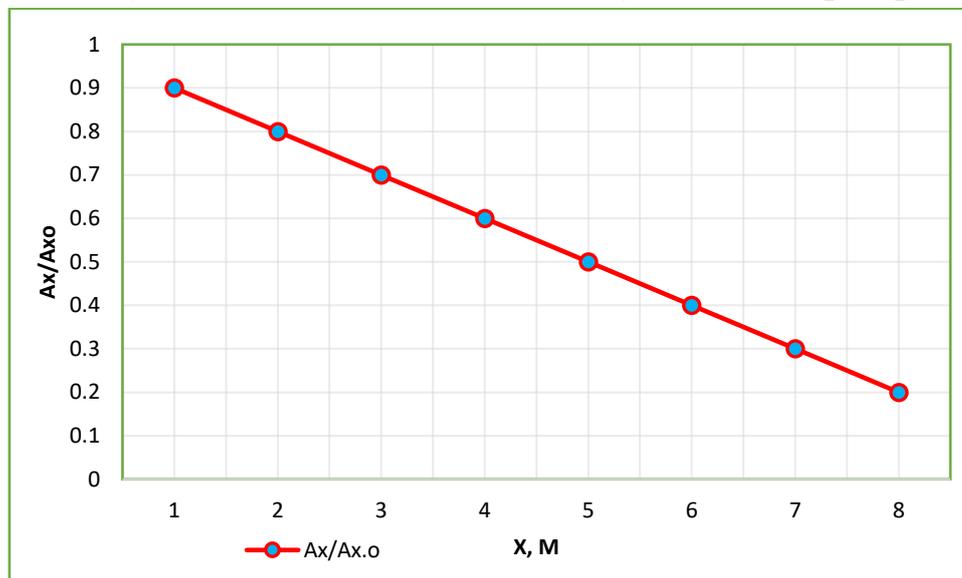


Рисунок 3.13 – Зависимость распределения амплитуды  $A/A_{\max}$  колебаний от на расстоянии  $x$  от зоны воздействия к амплитуде сигнала

По получению результате можно сделать вывод что амплитуда колебания в завесить от расставания  $r$  в первы очередь и амплитуда источника когда расстояния большие 100 амплитуда = 0.

Упругие колебания, воздействуя на пласт, меняют эффективную проницаемость среды. Изменение проницаемости запишется как:

$$k_{\text{ак}} = k_0 \left[ 1 + 0.7 \left( \frac{P_0 \cdot \sqrt{\frac{r_c}{r}} \cdot e^{-\alpha \cdot r - r_c}}{0.05 \cdot \frac{P_k - P_c}{r \cdot \ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)}} \right)^{1.7} \right] \quad (3.36)$$

где  $k_{\text{ак}}$  – проницаемость пористой среды при воздействии на нее упругих колебаний в м<sup>2</sup>,  $k_0$  – начальная проницаемость пласта в м<sup>2</sup>,  $r_c$  – радиуса скважины,  $R_k$  – радиус контура питания в м<sup>2</sup>,  $r$  – расстояние от источника колебаний до точки, в которой определяется амплитуда, расстояние  $r$  изменяется в пределах от  $r_c$  до  $R_k$ ,  $P_0$  – начальное значение акустического давления МПа,  $c$  – скорость продольных волн, которая обычно равна 3.4 км/с,  $\alpha$  – коэффициент затухания акустической волны.

Полученный результат представлен на рисунке 3.14, 3.15. Из рисунка видно, что проницаемость среды при прямом воздействии упругих колебаний возрастает в несколько раз и быстро падает при увеличении расстояния от излучателя, приближаясь к начальному значению.

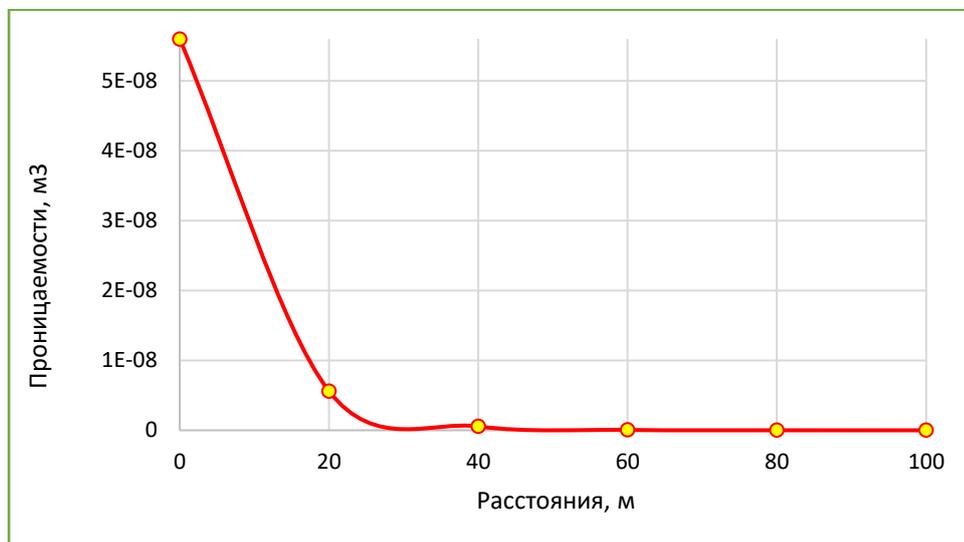


Рисунок 3.14 – График зависимости проницаемости от расстояния

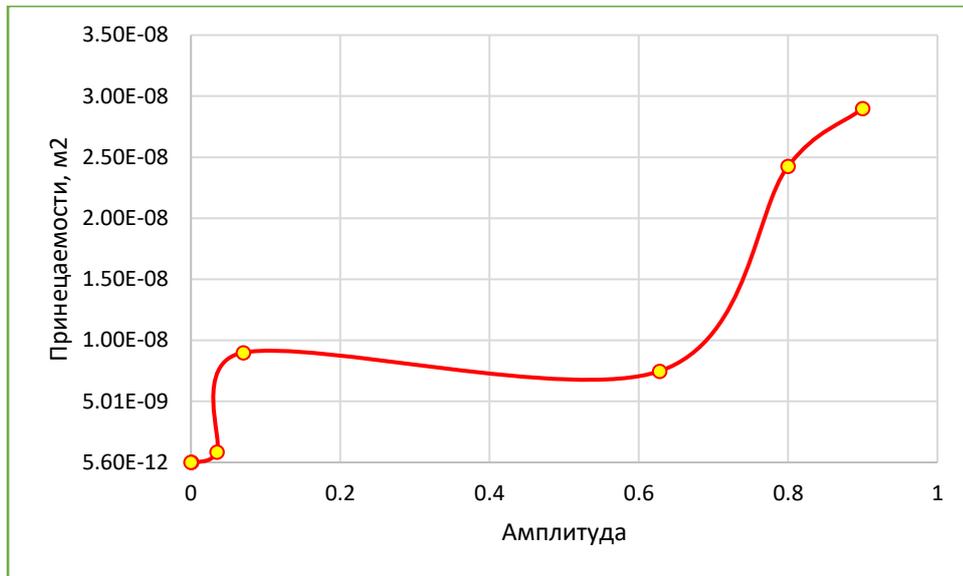


Рисунок 3.15 – График зависимости проницаемости от амплитуда

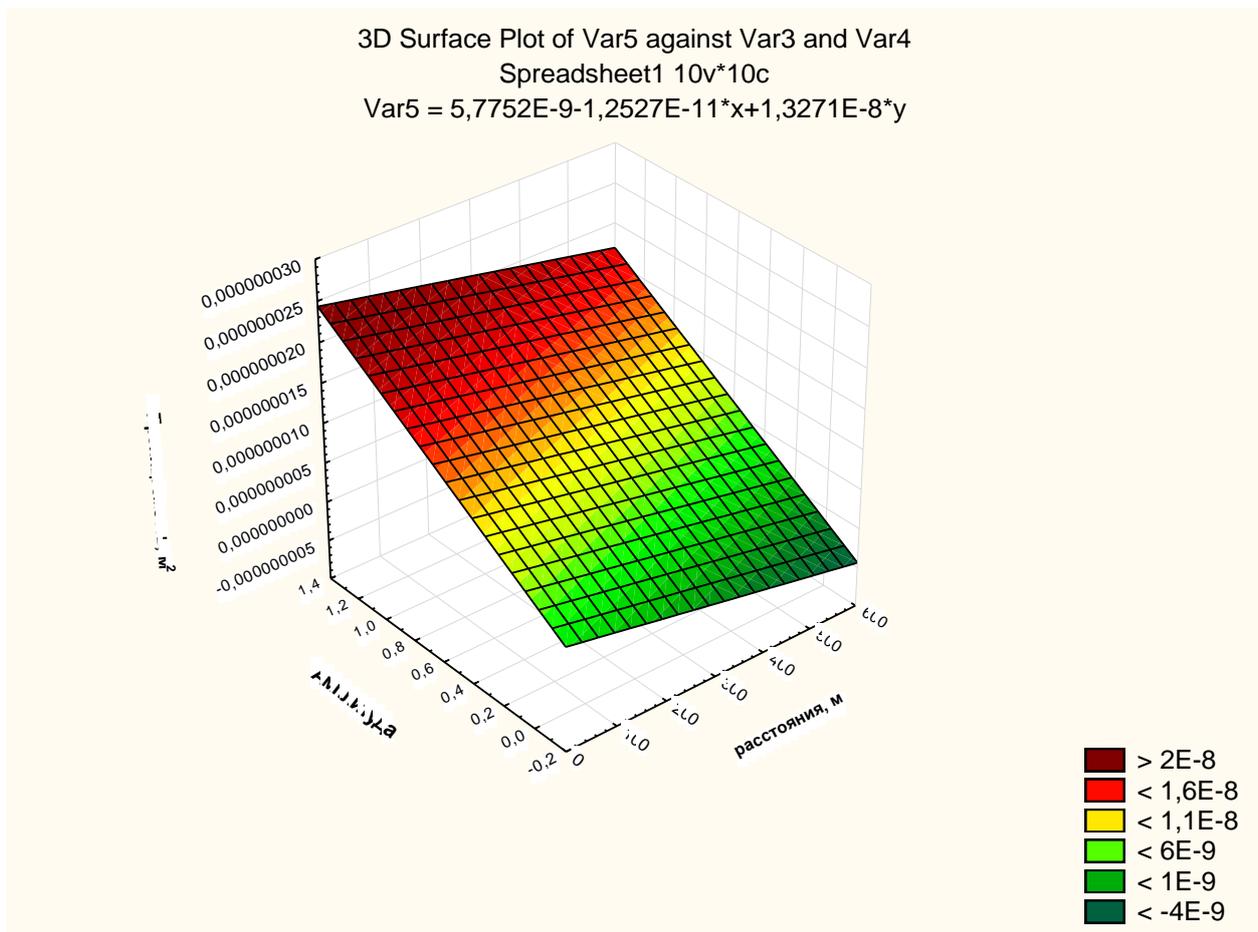


Рисунок 3.16 – График зависимости проницаемости от амплитуда и расстояния

Кроме того, при распространении акустических волн в насыщенной пористой среде увеличивается ее эффективная теплопроводность. Из своих

расчетов был исследован процесс распространения акустических волн, по полученным результатам была создана схема, показывающий распространение этих волн в пористой среде (рисунок 3.17).

В связи с содержанием в этой главе данных ноу-хау, часть данных была скрыта от общего доступа.

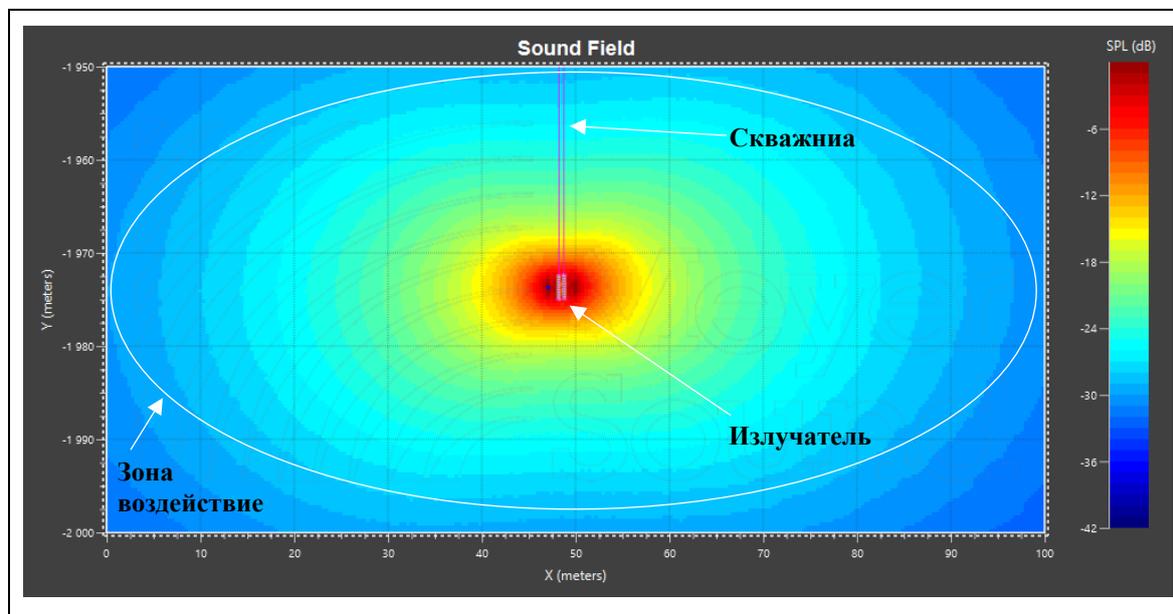


Рисунок 3.17 – Схема распространения акустических волн в пористой среде

Механизм распространения упругих колебаний в пласте образуется от излучателя, который создает эти волны со всех сторон вокруг скважины. Под мощностью ультразвуковых волн в жидкости образуются пузырьки, которые имеют две стадии: расширение и схлопывание. Схлопывание пузырьков вызывает высокую энергию в среде.

### 3.6 Методика расчета оценки вязкости

Зависимость динамической вязкости от амплитуды колебаний определяется выражением (3.37), которая преобразуется к следующему виду, если подставить туда формулу акустического давления (Рис.3.18) [55]:

$$\mu := \mu_0 \cdot \left( 0.80498 - 0.013468 \cdot \ln \left( P_0 \cdot \sqrt{\frac{r_c}{r}} \cdot e^{-\alpha \cdot r - r_c} \right) + 5.147 \cdot 10^{-7} \right)^2 \quad (3.37)$$

В связи с содержанием в этой главе данных ноу-хау, часть данных была скрыта от общего доступа.

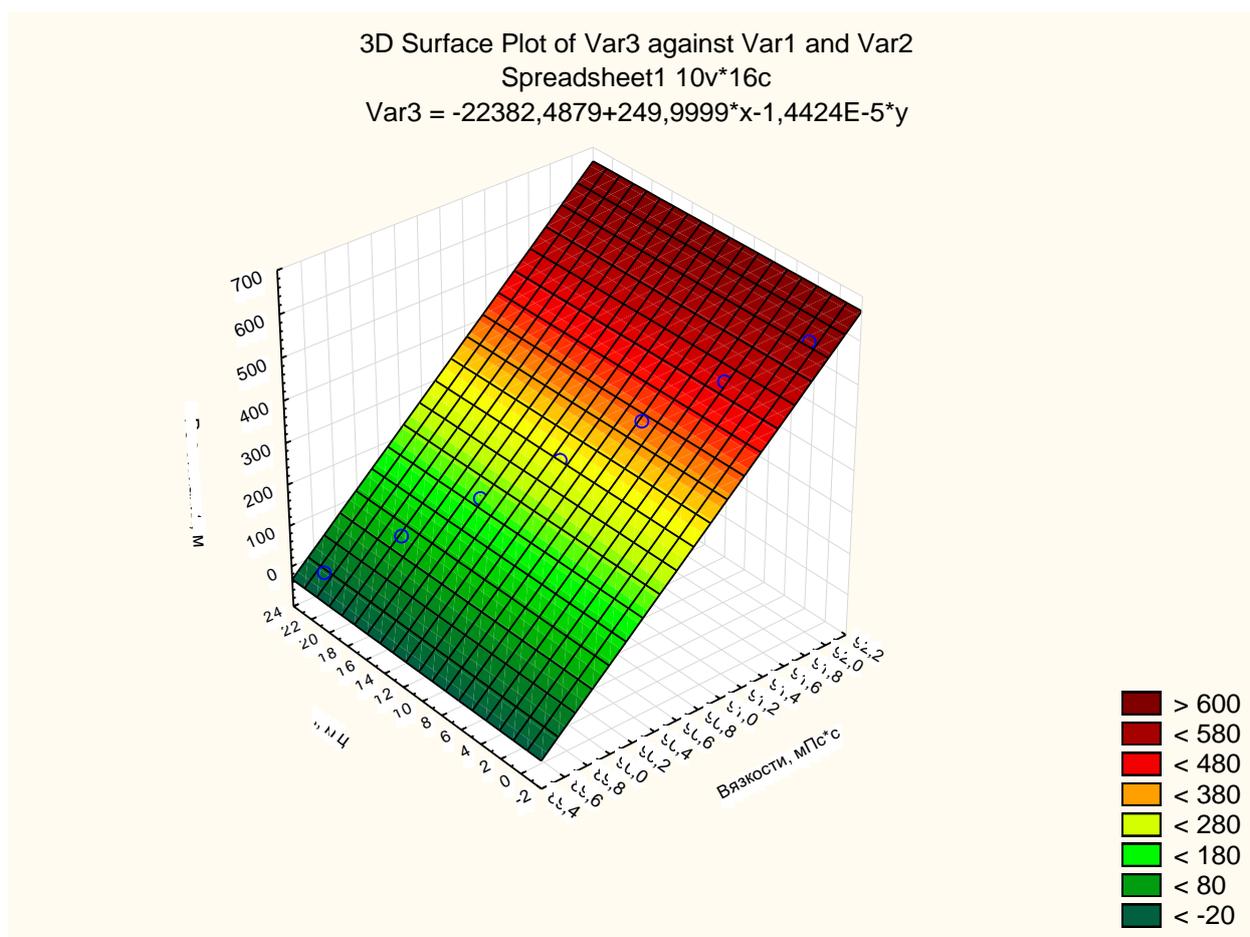


Рисунок 3.18 –. График зависимости вязкости от частоты и от расстояния

Вязкость нефти при прямом воздействии колебаний значительно уменьшается и остается на таком уровне опять же при малых частотах. Из графика так же видно, что она принимает свое изначальное значение лишь при удалении от скважины на очень большие расстояния в несколько сотен метров.

#### 4.7 Программное моделирование

Программное моделирование также было проведено Mohammed and Mahmoud [46] для сравнения экспериментальных результатов с результатами программного обеспечения и проверки результатов их эксперимента.

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов. Модель потока Дарси в сочетании с акустическим давлением в COMSOL multiphysics использовалась для оценки распределения давления и температуры в целевой среде при воздействии ультразвуковых волн. На рисунках 3.19 и 3.20. показано распределение давления и температуры соответственно.

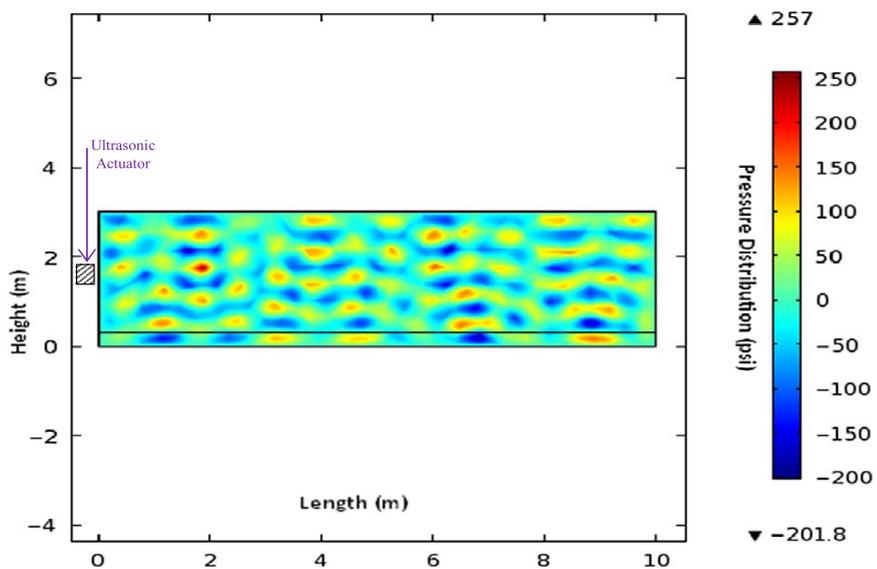


Рисунок 3.19 – Распределение давления в модели нефтяного пласта [46]

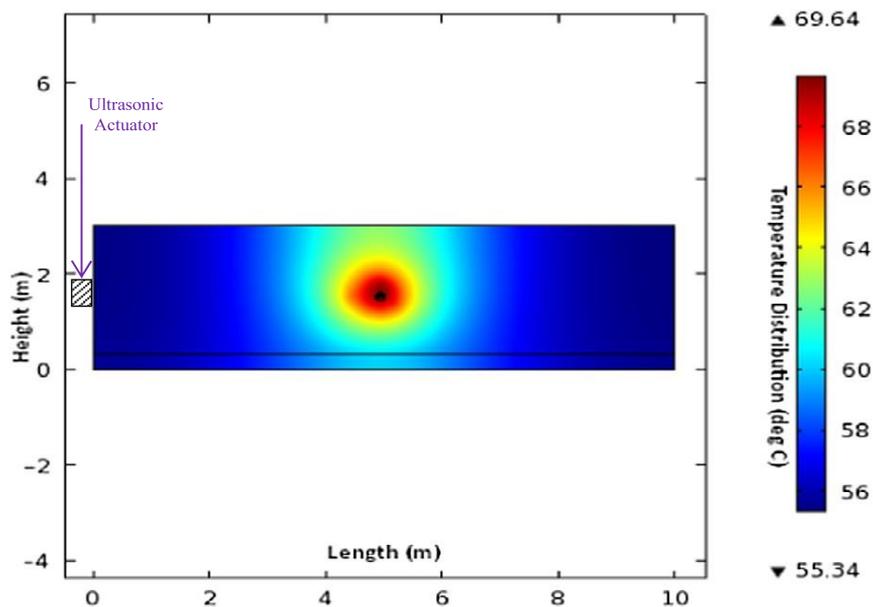


Рисунок 3.20 – Распределение температуры в модели нефтяного пласта [46]

#### 4.8 Методика расчет приток жидкости и газа к скважинам

Для определения дебита при установившейся радиальной фильтрации жидкости используют формулу Дюпюи

$$Q_L := \frac{2 \cdot 10^3 \pi \cdot K \cdot h}{\mu} \cdot \frac{(\Delta P)}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \quad (3.38)$$

где  $Q_J$  - объемный расход жидкости,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;

$k$  – проницаемость пласта,  $\text{мкм}^2$ ;

$h$  – толщина пласта,  $\text{м}$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $\text{мПа}$ ;

$R_{пл}$  – давление на круговом контуре питания радиусом  $R_k$ ,  $\text{мПа}$ ;

$R_{заб}$  – забойное давление,  $\text{мПа}$ ;

$r_c$  – радиус скважины,  $\text{м}$ .

Тогда объемный расход жидкости

$$Q_L := 3.264 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$Q = 282.01 \text{ м}^3/\text{сут}$$

### 3.9 Методика оценки производительности скважины [55]

Закон Дарси показывает линейную зависимость между объемным расходом жидкости или газа и перепадом давления в пористых средах. Этот закон имеет очень широкую область применения при добыче углеводородов и считается основным законом фильтрации жидкостей и газов. Закон Дарси является эмпирическим, он показывает как поровая жидкость движется при сравнительно малых градиентах давления. Также показывает характер движения, когда идет фильтрация воды через грунт под различными гидротехническими сооружениями, через стенки и дно каналов. Этот закон нужен для расчета производительности при добыче нефти и газа [55].

$$w = \frac{Q}{F} = \left(\frac{k}{\mu}\right) \left(\frac{\Delta P}{L}\right), \quad (3.39)$$

где  $v$  – скорость фильтрации флюида  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q$  – объемный расход флюидов в  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$F$  – площадь рассматриваемой пористой среды;

$k$  – коэффициент проницаемости  $\text{мкм}^2$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость флюида в  $\text{МПа}\cdot\text{с}$ ;

$\Delta P$  – перепад давления на длине  $L$ .

Помощью следующей формулы оцениваем производительности скважины;

$$Q \cdot \int_r^R \frac{\mu_0 \left[ (0.80498 - 0.013468 \cdot \ln \left( \left( P_0 \sqrt{\frac{r_c}{r}} \exp \left( -\frac{\pi f}{15 c} (r - r_c) \right) \right) + 5.147 \cdot 10^{-7} \right) \right]}{k_0 \left[ 1 + 0.7 \left( \frac{P_0 \sqrt{\frac{r_c}{r}} \exp \left( -\frac{\pi f}{15 c} (r - r_c) \right)}{0.05 \cdot \frac{P_K - P_C}{r \ln \frac{R_K}{r_c}}} \right)^{1.7} \right]} dr =$$

$$2\pi h \cdot \int_{P_c}^{P_k} dP, \quad (3.40)$$

Для вычисления которого лучше воспользоваться численными значениями и рассчитать дебит скважины для разных частот. Результаты расчетов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Значения дебита скважины [55]

№	Дебит, м <sup>3</sup> /сут	Частота, кГц
1	300	3,7
2	292,622	7,36
3	285,244	11,02
4	277,866	14,68
5	270,488	18,34
6	263,11	22
7	255,732	25,66
8	248,354	29,32
9	240,976	32,98
10	233,598	36,64
11	226,22	40,3
12	218,842	43,96
13	211,464	47,62
14	204,086	51,28

По полученным расчетам можно построить график зависимости дебита от частоты акустических колебаний (Рис. 3.21)

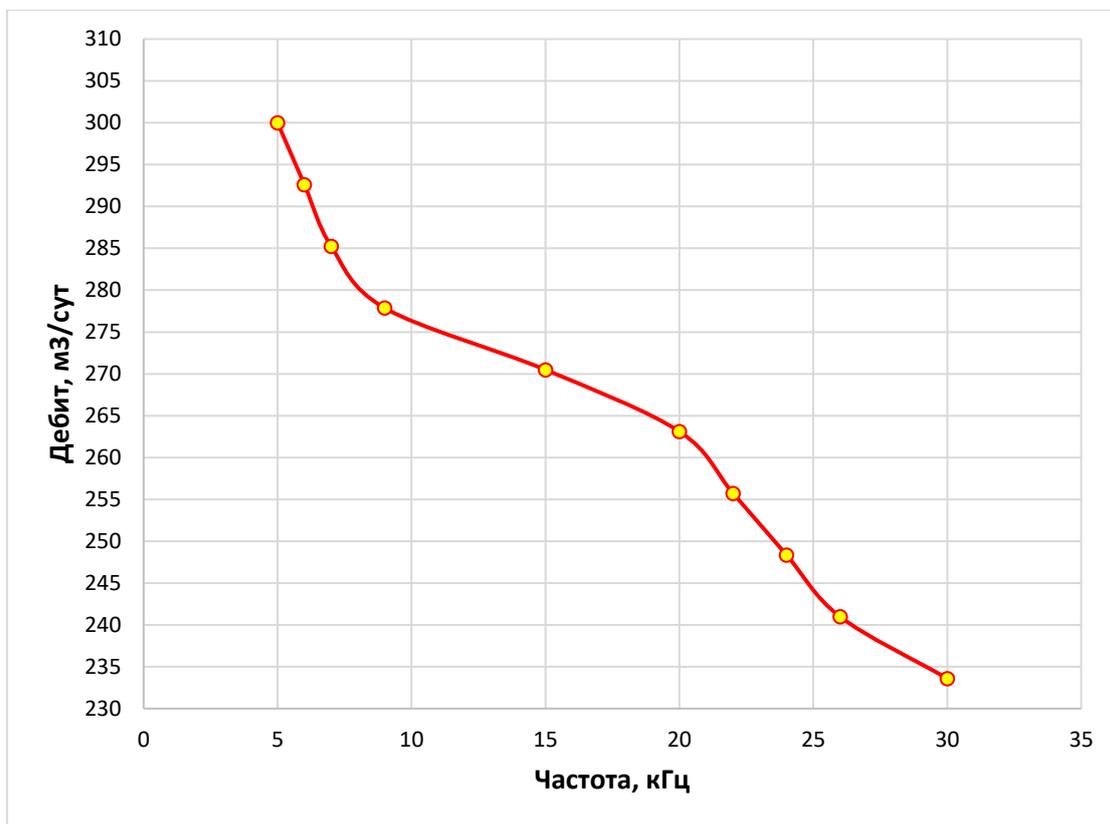


Рисунок 3.21 – График зависимости дебита скважины от частоты акустических колебаний [55]

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для глубокого воздействия на пласт излучатели должны быть низкочастотными, так как при увеличении частоты амплитуда колебаний очень быстро падает по экспоненте, что мы уже видели на графике зависимости акустического давления от частоты и от расстояния.

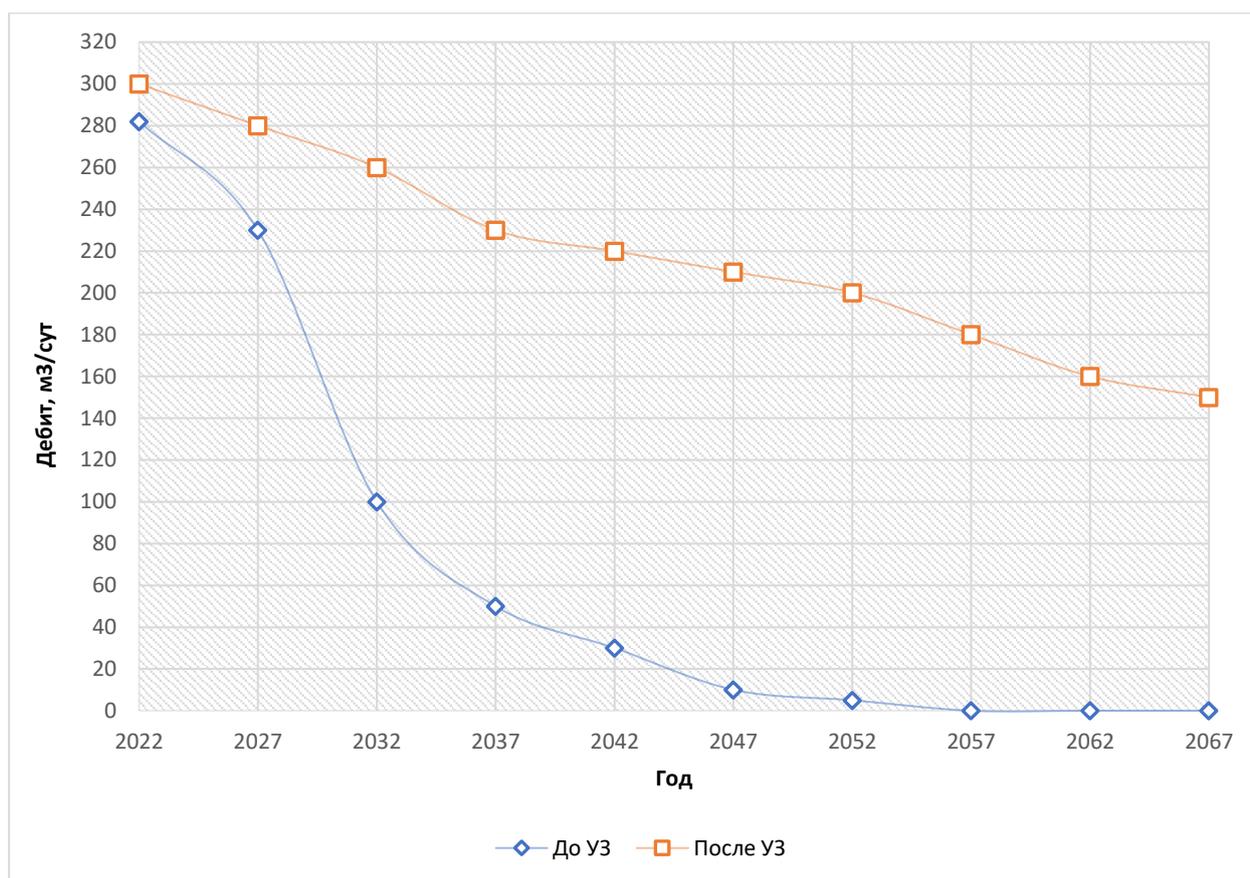


Рисунок 3.22 – График прогноз зависимости дебита скважины до и после УЗ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующий вывод: при волновом воздействии на нефтяную скважину на частотах менее 5 кГц составляет в среднем 35%, для более высоких частот до 15 кГц прирост производительности падает до 4%. Для глубокого воздействия на продуктивный пласт на расстояниях в сотни метров, излучатели упругих колебаний должны быть довольно низкочастотными. Частота таких излучателей должна составлять порядка единиц кГц [55].

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

Исследование использования скважинного сейсмического источника в модели полуплоскости для анализа характеристик распространения упругих волн в низкопроницаемом и неоднородном нефтяном пласте показывает значительный потенциал для улучшения методов извлечения нефти. Основные выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Увеличение волновой энергии при приближении к границе нефтяного пласта: Наблюдается тенденция к увеличению волновой энергии, что указывает на возможность использования этого эффекта для улучшения эффективности вытеснения нефти из породы за счет усиления перетока внутри слоев пласта.

2. Влияние временной частоты на дебит нефти: Мезоскопическая частота 3,0 Гц способствует увеличению мгновенного переноса нефти (дебит до 2,5% в сутки), что подчеркивает важность выбора оптимальной частоты для максимизации выноса остаточной нефти.

3. Сочетание методов для улучшения извлечения нефти: Использование сейсмических волн в сочетании с методом заводнения позволяет значительно увеличить добычу нефти как в низко-, так и в высокопроницаемых зонах зрелого нефтяного пласта, что подтверждает потенциал интеграции различных методов для оптимизации процесса извлечения.

4. Зависимость производительности от частоты воздействия: При частотах менее 5 кГц наблюдается средний прирост производительности на уровне 35%, тогда как на более высоких частотах до 15 кГц прирост снижается до 4%. Это подчеркивает необходимость выбора низкочастотных излучателей упругих колебаний для глубокого воздействия на продуктивный пласт.

В целом, результаты исследования подчеркивают значимость точного подбора параметров сейсмического воздействия, включая частоту и методы воздействия, для оптимизации процессов добычи нефти из неоднородных коллекторов. Это может привести к значительному улучшению эффективности извлечения нефти, особенно в условиях низкопроницаемых и зрелых нефтяных пластов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был рассмотрен один из важнейших физических методов повышения нефтеотдачи пласта.

Волновые волны воздействуют на продуктивные пласты для решения ряда проблем в добычи нефти и повышения нефтеотдачи пласта: снижения вязкости нефти, снижения остаточной нефтенасыщенности, улучшение проницаемости и предотвращения образования отложений.

На основании выше проведенных результатов исследования и математического моделирования можно отметить, что сочетание периодической обработки ультразвуком, низкой частоты и небольшого расстояния от источника энергии дает лучший коэффициент извлечения нефти. Более надежные результаты могут быть получены при испытании, проведенном в пластовых условиях. Данная технология находится в ряду методов интенсификации работы пласта. Их эффективность определяется необходимостью достижения следующих целей:

- экономическая и технологическая эффективность от воздействия;»
- безопасность и чистота экологии;
- совместимость по технологическим особенностям и технической реализации применения с существующими методами воздействия на пласт.

Рекомендации для дальнейшего применения и исследования включают:

1. Проведение дополнительных пластовых испытаний для подтверждения эффективности метода в различных условиях и для разных типов нефтяных месторождений.

2. Разработка комплексного подхода, включающего как волновое воздействие, так и другие методы интенсификации работы пласта, для достижения наилучших результатов в увеличении нефтеотдачи.

3. Оценка экономической эффективности применения данного метода в сравнении с традиционными способами воздействия на пласт, чтобы обеспечить его конкурентоспособность и широкое распространение.

4. Обеспечение экологической безопасности метода, анализ возможных негативных последствий для окружающей среды и разработка мер по их минимизации.

5. Совершенствование технологического оборудования для реализации метода, учитывая его особенности и требования к точности и стабильности параметров воздействия.

6. Проведение междисциплинарных исследований, включая геологию, физику, химию и инженерные науки, для глубокого понимания процессов, происходящих в пласте под воздействием волновых волн, и разработки наиболее эффективных стратегий их использования.

### Литература к главе 3

1. Yakasai F. Current developments and future outlook in nanofluid flooding: A comprehensive review of various parameters influencing oil recovery mechanisms / F. Yakasai, M. Z. Jaafar, S. Bandyopadhyay et al. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – Vol. 93. – P. 138-162. DOI: 10.1016/j.jiec.2020.10.017
2. Tapia J.F.D. Optimal CO<sub>2</sub> allocation and scheduling in enhanced oil recovery (EOR) operations / J. F. D. Tapia, J.-Y. Lee, R. E. H. Ooi et al. // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 184. – P. 337-345. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.09.093
3. Druetta P. Chemical enhanced oil recovery and the role of chemical product design / P. Druetta., P. Raffa, F. Picchioni // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 252. – P. 113480. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113480
4. Doman E. L. World Energy Demand and Economic Outlook / Doman E.L // *International Energy Outlook*. – 2016.
5. Kakati, A. Low salinity polymer flooding: effect on polymer rheology, injectivity, retention, and oil recovery efficiency / A. Kakati, G. Kumar, J.S. Sangwai // *Energy & Fuels*. – 2020. – Vol. 34, No 5. – P. 5715-5732. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c00393
6. Adeyemi I. Recent developments, challenges, and prospects of ultrasound-assisted oil technologies / I. Adeyemi, M. Meribout, L. Khezzer // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2022. – Vol. 82. – P. 105902. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105902
7. Nhut L. The Effective and Exergy Efficiency of Multi-Pass Solar Air Collector with Longitudinal Fins: Analysis and Optimization / L.M. Nhut, H.N. Minh, L.N. Thanh // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2023. – Vol 102, No 2.– P 42-65.
8. Al Rizeiqi N.M. Potential of Underground Hydrogen Storage in Oman/ N.M. Al Rizeiqi, N. Al Rizeiqi, A. Nabavi // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. –2022. –Vol27, No1. –P9-31.
9. Tveiten, O.G. Recycling CO<sub>2</sub> for EOR? Why Not?/ O.G. Tveiten // *Journal of Petroleum Technology*.–2023.–February1.
10. Abdullahi M.B. Synergistic effect of Polymer-Augmented low salinity flooding for oil recovery efficiency in Illite-Sand porous media / M.B. Abdullahi, S.R. Jufar, S. Kumar et al. // *Journal of Molecular Liquids*.–2022.–Vol358.–P119217.
11. Sun, Q.R. Seismic vibration for improved oil recovery:A comprehensive review of literature/ Q.R. Sun, A.M Amani // *International Journal of Hydrogen Energy*.–2020.–Vol45No29.–P14756-14778.

12. Rahman M.D. I.RSM for Modelling the CO<sub>2</sub> Effect in the Interfacial Tension Between Brine and Waxy Dulang Crude Oil During LSW-WAG EOR / M.D. Rahman // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2021.–Vol85No2.–P159-174.DOI:10
13. Jeong, C. On the feasibility of inducing oil mobilization in existing reservoirs via wellbore harmonic fluid action / C. Jeong, Kallivokas C.L.F // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2011. –Vol76No3-4.–P116-123.DOI:10
14. Hamidzadeh H.R. Wave propagation in solid and porous half-space media/ H.R. Hamidzadeh, L. Dai Jazar // Berlin: Springer. –2014.DOI:10
15. Wooden B. Technology Update: Seismic Stimulation: An Eco-Friendly ,Effective EOR Alternative / B. Wooden // *Journal of Petroleum Technology*.–2018.Vol70No08.–P21-23.DOI:10
16. Dai L. Effects of low frequency external excitation on oil slug mobilization and flow in a water saturated capillary model / L. Dai, Y. Zhang // *Petroleum*. – 2019. – Vol. 5, no. 4. – P. 375-381. DOI: 10.1016/j.petlm.2019.03.001
17. Jeong C. Estimation of oil production rates in reservoirs exposed to focused vibrational energy / C. Jeong, L.F. Kallivokas, C. Huh el al. // In *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. OnePetro, 2014. DOI: 10.2118/169079-MS
18. Kurawle I. Seismic EOR-the optimization of aging waterflood reservoirs / I. Kurawle, M. Kaul, N. Mahalle el al. // In *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition*. OnePetro, 2009. DOI: 10.2118/123304-MS
19. Abdullahi M.B. Appraising the impact of metal-oxide nanoparticles on rheological properties of HPAM in different electrolyte solutions for enhanced oil recovery / M.B. Abdullahi, K. Rajaei, Junin R. el al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 1057-1068. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.013
20. Kang P.S. Temperature dependence of relaxation time of hydrolyzed polyacrylamide solution for enhanced oil recovery / P.S. Kang, J.S. Lim, C. Huh // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2019. – Vol. 78. – P. 257-264. DOI: 10.1016/j.jiec.2019.06.004
21. Kouznetsov O.L. Improved oil recovery by application of vibro-energy to waterflooded sandstones / O.L. Kouznetsov, E.M. Simkin, G.V. Chilingar el al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 1998. – Vol. 19, no. 3-4. – P. 191-200. DOI: 10.1016/S0920-4105(97)00022-3
22. Furman K. Increasing wells injectivity and productivity by seismic and seismo-chemical stimulation / K. Furman, S. Miftakhov, M. Nazyrov, R. Nefedov el

al. // In SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. OnePetro, 2018. DOI: 10.2118/190456-MS

23. Huh C. Improved oil recovery by seismic vibration: a preliminary assessment of possible mechanisms / C. Huh // In International Oil Conference and Exhibition in Mexico. OnePetro, 2006. DOI: 10.2118/103870-MS

24. Louhenapessy S.C. The effect of type waves on vibroseismic implementation of changes properties of rock, oil viscosity, oil compound composition, and enhanced oil recovery / S.C. Louhenapessy, T. Ariadji // Petroleum Research. – 2020. – Vol. 5, no. 4. – P. 304-314. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2020.05.001

25. Kostrov S. Possible mechanisms and case studies for enhancement of oil recovery and production using in-situ seismic stimulation / S. Kostrov, W. Wooden // In SPE Symposium on Improved Oil Recovery. OnePetro, 2008. DOI: 10.2118/114025-MS

26. Allahverdiyev P.Q. Improved sweep efficiency through seismic wave stimulation / P.Q Allahverdiyev. – PhD diss., The University of Texas at Austin, 2012.

27. / Jeong C. Maximization of wave motion within a hydrocarbon reservoir for wave-based enhanced oil recovery / C. Jeong, L.F. Kallivokas, S. Kucukcoban et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering – 2015 – Vol .129 – P .205-220.

28. Abdullahi M.B. Characteristics of SH-wave propagation during oil reservoir excitation using BEM formulation in half-plane model representation / M.B. Abdullahi, S.R. Jufar, S. Kumar, et al. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2023 – Vol .162 – P .105303.

29. Simkin E.M. Advanced vibroseismic technique for water flooded reservoir stimulation, mechanism and field tests results / E.M. Simkin, M. L. Surguchev // European Symposium on Improved Oil Recovery. – Vol. 19, no. 3-4. – P. 191-200. DOI:10.3997/2214-4609.201411251

30. Beresnev G.A. Theory of vibratory mobilization on nonwetting fluids entrapped in pore constrictions / G.A. Beresnev // Geophysics 71, no 6 (2006): N47-N56.

31. Beckham, R.E. Mobilization of colloidal particles by low-frequency dynamic stress stimulation / R.E. Beckham, A.I. Abdel-Fattah, P.M. Roberts et al. // Langmuir. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 19-27. DOI: 10.1021/la900890n

32. Roberts P.M. Seismic stress stimulation mobilizes colloids trapped in a porous rock / P.M. Roberts, A.I. Abdel-Fattah // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 284, No. 3-4. P. 538-543. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.05.017

33. Roberts P.M. Elastic wave stimulation of oil reservoirs: Promising EOR technology? / P.M. Roberts, I.B. Esipov, E.L. Majer // *The Leading Edge*. 2003. Vol. 22, No. 5. P. 448-453. DOI: 10.1190/1.1579578
34. Roberts P.M. Steck. Enhanced DNAPL transport in a sand core during dynamic stress stimulation / P.M. Roberts, A. Sharma, V. Uddameri et al. // *Environmental Engineering Science*. 2001. Vol. 18, No. 2. P. 67-79. DOI: 10.1089/10928750151132230
35. Vogler E.T. Chrysikopoulos. An experimental study of acoustically enhanced NAPL dissolution in porous media / E.T. Vogler, C.V. Chrysikopoulos // *AIChE Journal*. 2004. Vol. 50, No. 12. P. 3271-3280. DOI: 10.1002/aic.10221
36. Spanos T. Pressure pulsing at the reservoir scale: a new IOR approach / T. Spanos, B. Davidson, M. Dusseault et al. // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2003. Vol. 42, No. 02. DOI: 10.2118/03-02-01
37. Iassonov P.P. A model for enhanced fluid percolation in porous media by application of low-frequency elastic waves / P.P. Iassonov, I.A. Beresnev // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. Vol. 108, No. B3. DOI: 10.1029/2001JB000683
38. Li W. Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism / W. Li, R.D. Vigil, I.A. Beresnev et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005. Vol. 289, No. 1. P. 193-199 DOI: 10.1016/j.jcis.2005.03.067
39. Beresnev I. Direct pore-level observation of permeability increase in two-phase flow by shaking / I. Beresnev, W. Gaul, R.D. Vigil // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, No. 20. DOI: 10.1029/2011GL048840
40. Luo X. Recent advances in applications of power ultrasound for petroleum industry / X. Luo, H. Gong, Z. He et al. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 70. P. 105337. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105337
41. Deng W. Dynamics and dislodgment from pore constrictions of a trapped nonwetting droplet stimulated by seismic waves / W. Deng, M.B. Cardenas // *Water Resources Research*. 2013. Vol. 49, No. 7. P. 4206-4218. DOI: 10.1002/wrcr.20335
42. Jeong C. On an inverse-source problem for elastic wave-based enhanced oil recovery / C. Jeong // PhD diss., The University of Texas at Austin. 2011.
43. Newmark N.M. A method of computation for structural dynamics / N.M. Newmark // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1959. Vol. 85, No. 3. P. 67-94. DOI: 10.1061/JMCEA3.0000098

44. Zhao L. Seismic reflection dispersion due to wave-induced fluid flow in heterogeneous reservoir rocks / L. Zhao, D. Han, Q. Yao et al. // *Geophysics*. 2015. Vol. 80, No. 3. P. D221-D235. DOI: 10.1190/geo2014-0307.1
45. Müller T. Seismic wave attenuation and dispersion due to wave-induced flow at mesoscopic heterogeneities-A review / T. Müller, B. Gurevich, M. Lebedev // *Geophysics*. 2010. Vol. 75, No. 5. P. 75A147-75A164. DOI: 10.1190/1.3463417
46. Zheng, P. Elastic wave attenuation and dispersion induced by mesoscopic flow in double-porosity rocks / P. Zheng, B. Ding, X. Sun // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. Vol. 91. P. 104-111. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.018
47. Carcione J.M. Computational poroelasticity-A review / J.M. Carcione, C. Morency, J.E. Santos // *Geophysics*. 2010. Vol. 75, No. 5. P. 75A229-75A243 DOI: 10.1190/1.3474602
48. Westermark R.V. Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation / R.V. Westermark, J.F. Brett, D.R. Maloney // *In SPE Production and Operations Symposium OnePetro, 2001* DOI: 10.2118/67303-MS
49. Sunhazim N.S.A.M. Characterization of fluid flow through porous media / N.S.A.M. Sunhazim, U.A. Norhaidi, M.A.W. Muhammad et al. // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol .96. No .2.P .22-32 . DOI:10.37934/arfmts.96.2.2232
50. Kasim A.R.M. Flow Analysis on Boundary Layer of Porous Horizontal Circular Cylinder Filled by Viscoelastic-Micropolar Fluid / A.R.M. Kasim, L.A. Aziz, N.A.N. Ariffin et al.// *CFD Letters*. 2022.Vol .14. No .11. P .49-62. DOI:10.37934/cfdl.14.11.4962
51. Harolanuar M.N.H. Harolanuar, Muhammad Nur Hanafi, Nurul Fitriah Nasir, Hanis Zakaria, and Ishkrizat Taib. "Analysis of Fluid Flow on the N95 Facepiece Filtration Layers" / M.N.H. Harolanuar, N.F. Nasir, H. Zakaria et al. // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol. 100, No. 1. P. 172-180. DOI: 10.37934/arfmts.100.1.172180
52. Li P. Time domain boundary element formulation for partially saturated poroelasticity / P. Li, M. Schanz // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2013. Vol. 37, No. 11. P. 1483-1498. DOI: 10.1016/j.enganabound.2013.08.002
53. Albers B. BEM and FEM results of displacements in a poroelastic column" / B. Albers, S.A. Savidis, H.E. Taşan et al. // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2012. Vol. 22, No. 4. P. 883-896. DOI: 10.2478/v10006-012-0065-y

54. Mohammed B.A. Seismic Wave Excitation of Mature Oil Reservoirs for Green EOR Technology" / B.A. Mohammed, R.J. Shiferaw, D. Iskandar et al. // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2023. Vol. 103, Issue 2. P. 180-196. DOI: 10.37934/arfmts.103.2.180196

55. Михайлов С.Б. Влияние волнового воздействия на производительность вертикальных и горизонтальных скважин / Михайлов С.Б. URL: [https://kpfu.ru/portal/docs/F1159678783/VKR\\_Mihajlov.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F1159678783/VKR_Mihajlov.pdf) (дата обращения: 03.06.2024).

56. Марфин Е.А. Скважинная шумометрия и виброакустическое воздействие на флюидонасыщенные пласты / Марфин Е.А. – Казань: Казанский университет, 2015. 45 с.

*Научное издание*

**Алфаяд** Ассим Гани Хашим  
**Кемалов** Руслан Алимович  
**Кемалов** Алим Фейзрахманович  
**Валиев** Динар Зиннурович

**WAVEWELLTECH: ИННОВАЦИОННАЯ  
ВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ**

Подписано к использованию 31.05.2024.  
Гарнитура «Times New Roman».  
Заказ 152/5.

Издательство Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужи́на, 1/37  
тел. (843) 206-52-14 (1704), 206-52-14 (1705)