

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тюменский индустриальный университет»

На правах рукописи



ВЕДМЕНСКИЙ АНТОН МАКСИМОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА
ПРОЦЕСС ФИЛЬТРАЦИИ В НЕФТЯНОМ ПЛАСТЕ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАСТЬ ДРЕНИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Мулявин Семен Федорович,
доктор технических наук, доцент

ТЮМЕНЬ – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ УПРУГИМИ КОЛЕБАНИЯМИ.....	12
1.1 Виды воздействия акустическими волнами на призабойную зону пласта с целью улучшения фильтрационно-емкостных характеристик.....	12
1.2 Методы воздействия акустическими колебаниями на продуктивный пласт с целью повышения нефтеотдачи	25
1.2.1 Методы повышения нефтеотдачи пласта при помощи вибросейсмического воздействия.....	26
1.2.2 Методы повышения нефтеотдачи пласта за счет внутрискважинных источников излучения.....	30
1.3 Классификация технических средств для реализации технологии акустического воздействия на нефтяные пласты.....	33
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	41
2.1.1 Физические основы акустического воздействия на насыщенные поровые среды	42
2.1.2 Исследования методов и результатов проведения экспериментов по акустическому воздействию на насыщенные пористые среды.....	47
2.2 Проведение лабораторных исследований	57
2.2.1 Методологические основы проведенных экспериментов по акустическому воздействию на насыщенные горные породы негармоническими колебаниями.....	57
2.2.2 Описание и подготовка образцов керна для проведения исследований	61
2.2.3 Измерение критического градиента давления начала фильтрации	63
2.2.4 Влияние негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности	69

2.2.5 Влияние негармонических акустических колебаний на коэффициент вытеснения нефти водой.....	80
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕГАРМОНИЧЕСКИМИ АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ.....	85
3.1 Метод воздействия на продуктивный пласт негармоническими акустическими колебаниями при одновременной добычи нефти	85
3.2 Выбор скважины-кандидата для проведения акустической обработки..	93
3.2.1 Краткая геолого-физическая характеристика эксплуатационного объекта.....	93
3.2.2 Сведения о разработке объекта	95
3.2.3 Выбор скважины-кандидата для применения акустического воздействия	101
3.2.4 Описание параметров моделирования.....	103
3.2.5 Результаты моделирования	105
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАСТЬ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА С ОСТАТОЧНЫМИ ЗАПАСАМИ НЕФТИ С ЦЕЛЮ ВОВЛЕЧЕНИЯ ИХ В РАЗРАБОТКУ	109
4.1 Механизм локального воздействия на область с невыработанными запасами нефти акустическими колебаниями.....	109
4.2 Распространение акустических волн в насыщенных пористых средах	118
4.3 Методика определения амплитудно-частотных характеристик акустических излучателей для воздействия на область пласта с невыработанными запасами нефти	128
4.4 Выбор, обоснование и описание характеристик эксплуатационного объекта для гидродинамического моделирования	129
4.5 Определение характеристик акустического поля.....	133
4.6 Моделирование результатов акустического воздействия на область пласта АС с целью повышения нефтеотдачи	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Главной задачей нефтегазодобывающей промышленности является обеспечение рентабельной добычи углеводородного сырья на протяжении всего срока эксплуатации продуктивных пластов. В этой связи актуальным является повышение добычи нефти. На сегодняшний день отмечается рост доли трудноизвлекаемых запасов углеводородов, которые характеризуются низкопроницаемыми коллекторами, высокой геологической неоднородностью или высоковязкой нефтью. В совокупности эти факторы приводят к низким коэффициентам извлечения нефти по разрабатываемым месторождениям.

Проблема особенно актуальна для эксплуатационных объектов Западной Сибири, к которым можно отнести залежи тюменской, баженовской и ачимовской свит.

В соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. №2914-р) необходимым является обеспечение рационального использования минерально-сырьевой базы за счет вовлечения в эксплуатацию трудноизвлекаемых запасов нефти и газа. В отчете ПАО «Роснефть» за 2018 год было заявлено о наличии активов с трудноизвлекаемыми запасами более 1 млрд тонн и стратегической цели по двукратному увеличению добычи ТРИЗ к 2022 году, что требует совершенствования технологий разработки. В первую очередь в отчете говорится о необходимости совершенствования технологий извлечения углеводородов из низкопроницаемых пластов, а также об интенсификации добычи высоковязкой нефти, запасы которой только на Русском месторождении превышают 400 млн тонн.

Среди перспективных технологий повышения нефтеотдачи можно отметить акустическое (волновое, виброволновое) воздействие на продуктивные пласты, которому посвящены труды ученых СССР и современной России, в том числе

авторов Тюменского индустриального института, института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Государственного университета «Дубна» и других научных школ. В данной диссертационной работе приводятся результаты промысловых испытаний различных акустических технологий. К настоящему времени запатентовано большое количество изобретений и полезных моделей технических устройств для осуществления акустического воздействия.

С практической точки зрения волновые технологии считаются неразрушающими и незагрязняющими методами воздействия на пласты, а лабораторные и промысловые испытания свидетельствуют об их технологической эффективности. Данная работа направлена на реновацию акустических методов воздействия ввиду развития и появления новых технических возможностей для совершенствования технологии.

Проведение исследований в этой области позволит найти эффективные решения, востребованные нефтедобывающими компаниями России.

Степень разработанности темы исследования

Проблемам повышения интенсификации притока флюидов и увеличению нефтеотдачи пластов за счет применения акустического воздействия посвящены труды ученых Кузнецова О.Л., Ганиева Р.Ф., Френкель Я.И., Био М.А., Дыбленко В.П., Абрамова О.В., Абрамова В.О., Симкина Э.М., Сургучева М.Л., Свалова А.М., Лысенко А.П., Николаевского В.Н. и других.

Цель диссертационной работы

Совершенствование технологии увеличения нефтеотдачи пластов и интенсификации притока нефти воздействием негармонических акустических колебаний на процесс разрушения пространственно-временных структур в насыщенной жидкостью поровой среде.

Основные задачи исследования

1. Классифицировать волновые методы воздействия на пласт относительно характеристик излучаемых колебаний и вызываемых ими эффектов с целью выявления возможности совершенствования акустической технологии.

2. Оценить влияние негармонических акустических колебаний на фильтрацию жидкости в поровой среде путем проведения экспериментальных исследований на созданной для этой цели специальной установке.

3. Найти зависимости изменения критического градиента давления начала фильтрации, коэффициента подвижности (k/μ) и коэффициента вытеснения нефти водой при воздействии негармоническими акустическими колебаниями на фильтрацию жидкости через образцы керна.

4. Обосновать техническое решение для воздействия на пласт негармоническими акустическими колебаниями при одновременной эксплуатации скважины и оценить технологический эффект от его внедрения путем гидродинамического моделирования.

5. Разработать методику определения оптимальных амплитудно-частотных характеристик внутрискважинных акустических излучателей для воздействия на межскважинную зону пласта с невыработанными запасами нефти.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является продуктивный пласт, предметом исследования – процессы фильтрации жидкости в насыщенной поровой среде при воздействии негармоническими акустическими колебаниями.

Научная новизна выполненной работы

1. Установлено снижение критического градиента давления начала фильтрации при негармоническом акустическом воздействии до 15%.

2. Выявлено повышение коэффициента подвижности (k/μ) при фильтрации воды через образцы керна при одновременном воздействии негармоническими акустическими колебаниями: в среднем на 19 % для низкопроницаемых образцов; в среднем на 6 % для высокопроницаемых образцов.

3. Установлено повышение коэффициента вытеснения модели нефти водой в среднем на 9% при воздействии негармоническими акустическими колебаниями.

4. Разработана методика определения амплитудно-частотных характеристик внутрискважинных акустических излучателей для воздействия на

межскважинную зону пласта с невыработанными запасами нефти, учитывающая распространение и взаимное наложение в коллекторе быстрых и медленных волн упругих колебаний от нескольких источников.

Защищаемые положения

1. При воздействии негармоническими акустическими колебаниями на насыщенную жидкостью поровую среду критический градиент давления начала фильтрации снижается до 15 %, при этом наблюдается обратно-пропорциональная зависимость эффекта снижения от абсолютной проницаемости исследованных образцов керна.

2. Негармонические акустические колебания увеличивают коэффициент подвижности в среднем на 6 % для образцов керна с высокой абсолютной проницаемостью и на 19 % для образцов с низкой проницаемостью.

3. Воздействие негармоническими акустическими колебаниями приводит к повышению коэффициента вытеснения нефти водой на 9 % в среднем по группам исследованных образцов керна.

4. Изменение амплитуды и частоты внутрискважинных акустических излучателей дает возможность обеспечить максимальную эффективность воздействия в заданной области пласта с невыработанными запасами нефти.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Результаты лабораторных экспериментов по воздействию негармоническими акустическими колебаниями на фильтрацию жидкостей позволят усовершенствовать технологию акустического воздействия на пласт с целью повышения нефтеотдачи.

2. Усовершенствованная технология акустического воздействия позволит производить обработку пласта при одновременной эксплуатации скважины, повышая рентабельность добычи нефти.

3. Методика и программа для ЭВМ, которые позволят определять оптимальные амплитудно-частотные характеристики акустического воздействия на межскважинную зону пласта с целью повышения нефтеотдачи.

Методология и методы исследования

Для достижения цели диссертационного исследования в работе использована совокупность методов научного познания – систематизация теоретической базы, лабораторных и промысловых исследований, экспериментальные лабораторные методы исследования, математическое и гидродинамическое моделирование изучаемых процессов, методы вычислительной математики и графоаналитические подходы.

Степень достоверности

Достоверность научных выводов подтверждена теоретическими и экспериментальными лабораторными исследованиями с использованием образцов керна, подготовленных по утвержденным методикам и ГОСТам. Результаты лабораторных исследований согласуются с имеющейся теоретической базой, а также с опубликованными экспериментальными данными других авторов. Достоверность эффективности рассмотренных методов повышения нефтеотдачи, выраженной в дополнительном извлечении нефти из межскважинной зоны пласта, подтверждается результатами гидродинамического моделирования с использованием сертифицированных программных продуктов.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XX Конференции молодых ученых и специалистов Филиала ООО «Лукойл-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени (Тюмень, 2020 г.); Международной научной конференции EAGE «Тюмень, 2019» (Тюмень, 2019 г.); национальной научно-технической конференции «Решение прикладных задач нефтегазодобычи на основе классических работ А.П. Телкова и А.Н. Лапердина» (Тюмень, 2019 г.); 7-ом международном инженерном конгрессе «Растущий фокус на лучших исследованиях: учимся у экспертов» (Манила, Филиппины, 2019 г.), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2020 г.), национальной научно-технической конференции

«Решение прикладных задач нефтегазодобычи на основе классических работ А.П. Телкова и А.Н. Лапердина» (Тюмень, 2021 г.).

Публикации

Результаты выполненных исследований отражены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях, опубликованных в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus, и в 3-х статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, библиографического списка, включающего 107 наименований, и заключения. Материал диссертации изложен на 160 страницах машинописного текста, включает 11 таблиц и 82 рисунка.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки) по пункту 2: Геолого-физические, геомеханические, физико-химические, тепломассообменные и биохимические процессы, протекающие в естественных и искусственных пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр и подземном хранении жидких и газообразных углеводородов и водорода известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для развития научных основ создания эффективных систем разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода, захоронения кислых газов, включая диоксид углерода; по пункту 3: Научные основы технологии воздействия на межскважинное и околоскважинное пространство и управление притоком пластовых флюидов к скважинам различных конструкций с целью повышения степени извлечения из недр и интенсификации добычи жидких и газообразных углеводородов; по пункту 5: Технологии и технические средства обустройства, добычи, сбора и подготовки скважинной продукции и технологические режимы их эксплуатации, диагностика оборудования и промышленных сооружений,

обеспечивающих добычу, сбор, внутрипромысловый транспорт и промышленную подготовку нефти и газа к транспорту, на базе разработки, развития научных основ, ресурсосбережения и комплексного использования пластовой энергии и компонентов осваиваемых минеральных ресурсов с учетом гидрометеорологических, инженерно-геологических и географических особенностей расположения месторождений.

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ УПРУГИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

По существу, акустические, вибрационные, виброволновые, вибросейсмические методы воздействия являются процессами одного рода, связанными с возбуждением упругих колебаний в призабойной зоне пласта или на поверхности. С практической точки зрения эффективность воздействия акустическими полями на пористую насыщенную среду (коллекторы нефти и газа) может быть выражена в двух проявлениях: очистка призабойной зоны пласта за счет расколматации поровых каналов и повышение нефтеотдачи пласта за счет вытеснения дополнительной нефти из коллектора [1]. В первом случае происходит повышение коэффициента продуктивности (для добывающих скважин) или приемистости (для нагнетательных скважин). Этот процесс приводит к интенсификации добычи нефти или оптимизации закачки вытесняющего агента. Данные явления имеют разные причины и особенности, поэтому для их реализации требуются акустические поля различных характеристик. В первую очередь именно частота и амплитуда упругой волны влияет на область, которая может быть подвержена обработке (за счет дальности проникновения поля в насыщенную пористую среду). Также крайне важно учитывать фильтрационно-емкостные характеристики коллектора и реологические параметры насыщающего флюида, которые также будут подвержены изменениям в зависимости от параметров приложенного поля. В данном разделе рассмотрены технологии виброакустического воздействия на пласт направленные на вышеуказанные цели.

1.1 Виды воздействия акустическими волнами на призабойную зону пласта с целью улучшения фильтрационно-емкостных характеристик

К данному направлению можно отнести технологии средне- и высокочастотного (включая ультразвуковой диапазон) воздействия из скважины

при помощи специальных технических устройств. Ультразвук – это упругие волны механических колебаний, распространяющихся в жидкой, твердой и наполненной газом среде, частота которых лежит в диапазоне, находящемся выше диапазона частот, воспринимаемого человеческим ухом (16 000 Гц). На сегодняшний день ультразвуковое воздействие получает все более широкое применение в технологических процессах. На рисунке 1.1 отображена классификация применения ультразвуковых технологий в промышленности.



Рисунок 1.1 – Классификация применения ультразвука в промышленности

Обширные промысловые испытания технологий, основанных на виброволновом воздействии ультразвукового диапазона, говорят о том, что они успешно зарекомендовали себя как средство повышения продуктивности скважин. Научный руководитель разработок НПП "Ойл-инжиниринг", член-

корреспондент РАЕН, кандидат технических наук, долгое время занимающийся вопросами изучения виброволнового воздействия на нефтяные пласты, Дыбленко Валерий Петрович указывает в своих работах, что обработка ультразвуковым полем призабойной зоны скважины приводит к возникновению следующих эффектов: кавитационные явления, увеличение звукового давления, изменение адгезионных сил, изменение температуропроводности флюидонасыщенных сред. Эти явления приводят к повышению скорости фильтрации, очистки перфорационных каналов, уменьшению скин-эффекта. В свою очередь это способствует повышению продуктивности скважин.

Также Дыбленко В.П. в своем обзоре волновых методов [1] приводит следующие особенности высокочастотного акустического воздействия на призабойную зону. Данный тип воздействия охватывает малые области ПЗП, представляет собой упругие колебания, имеющие волновой характер именно в призабойной зоне. При интенсивности упругих волн более 1 кВт/м^2 наблюдаются нелинейные эффекты в локальных объемах пласта вблизи источника излучения волн.

Обобщенная для большинства технологий ультразвуковая обработка выглядит следующим образом: в зону перфорации на кабеле опускается излучатель ультразвуковых колебаний, и в течение некоторого времени (как правило от 30 минут до часа) производится воздействие. Затем, если это необходимо ввиду протяженной перфорированной зоны, излучатель поднимается выше и процесс повторяется. После прохождения всего интервала обработка завершается и скважина готова к работе. На рисунке 1.2 представлена схема проведения обработки ПЗП по технологии, проводимой на промысле центром ультразвуковых технологий на основании патентов №2396420 и 2392422 [2, 3], разработанных ООО "ВИАТЕХ". Авторы данной технологии Абрамов Олег Владимирович и Абрамов Владимир Олегович, посвятившие свою деятельность исследованиям воздействия ультразвуковых колебаний на различные вещества, приводят следующие технологические особенности и преимущества, к которым приводит применение ультразвукового воздействия на промысле.

При выводе скважины из бурения или ремонта ультразвуковая обработка позволяет разрушить граничный слой, который удерживает глобулы фильтрата бурового раствора, вынести загрязняющие частицы из породы, повысить продуктивность или приемистость скважины. При постоянной работе скважины, прошедшей обработку, эффект может сохраняться до двух лет.

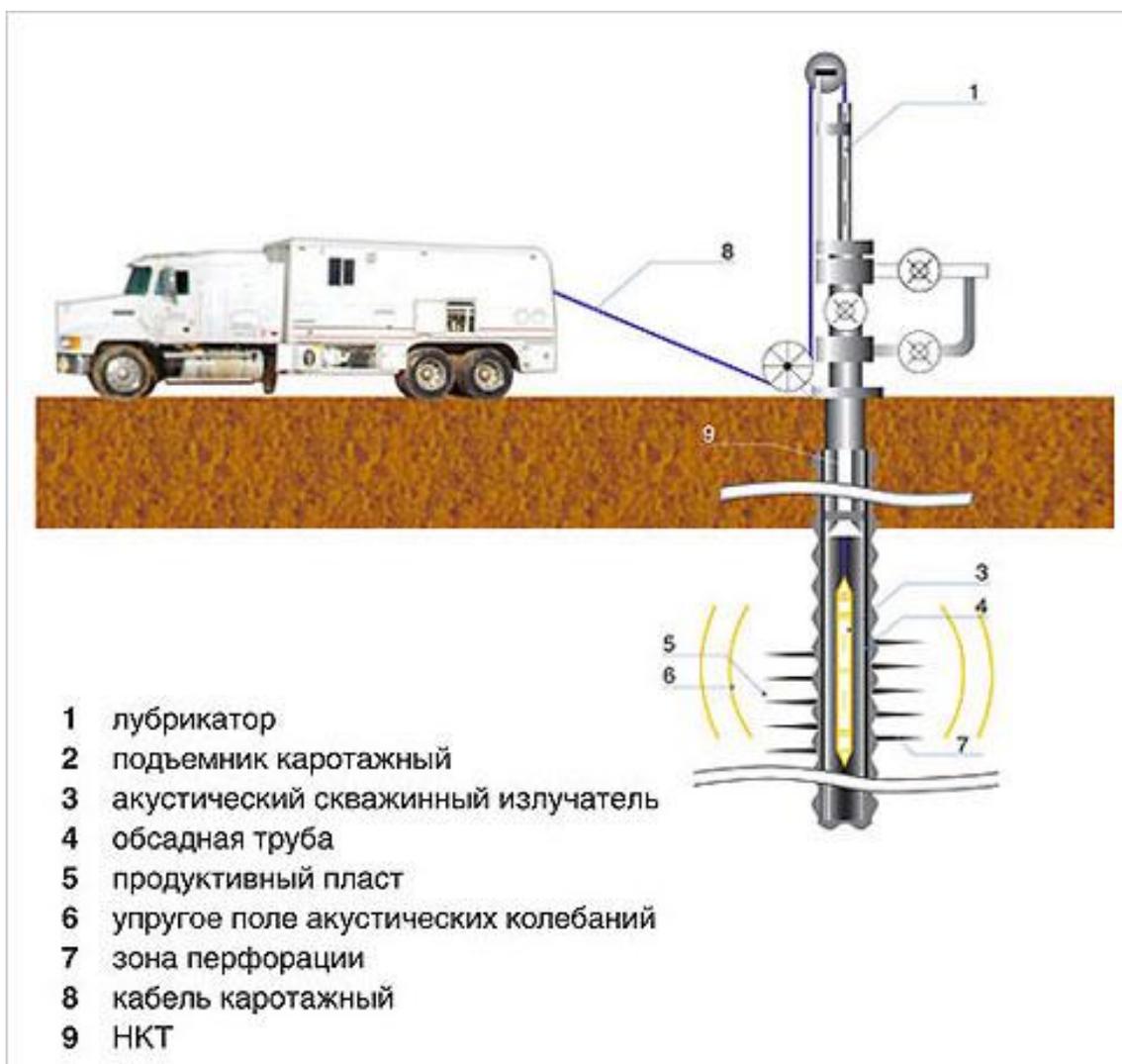


Рисунок 1.2 – Технология ультразвуковой обработки призабойной зоны пласта

Для повышения продуктивности скважин с высоковязкой нефтью авторами предлагается технология, принцип которой представлен на рисунке 1.3. Прибор диаметром 102 мм, закрепляемый на НКТ, устанавливается во время капитального ремонта скважины и включается периодически во время ее дальнейшей работы. После обработки снижается вязкость нефти, повышается скорость течения в призабойной зоне, увеличивается область дренирования.

В работах [4, 5] указано, что изменение реологических свойств флюидов и появление указанных выше характеристик фильтрации вызваны следующими физическими явлениями, возникающими в поле ультразвуковых колебаний: кавитация, сонокапиллярный эффект (открытие Е.Г. Коновалова, 1961 г), заключающийся в многократном повышении столба жидкости в капилляре при ультразвуковом воздействии, и разрушение межмолекулярных связей.

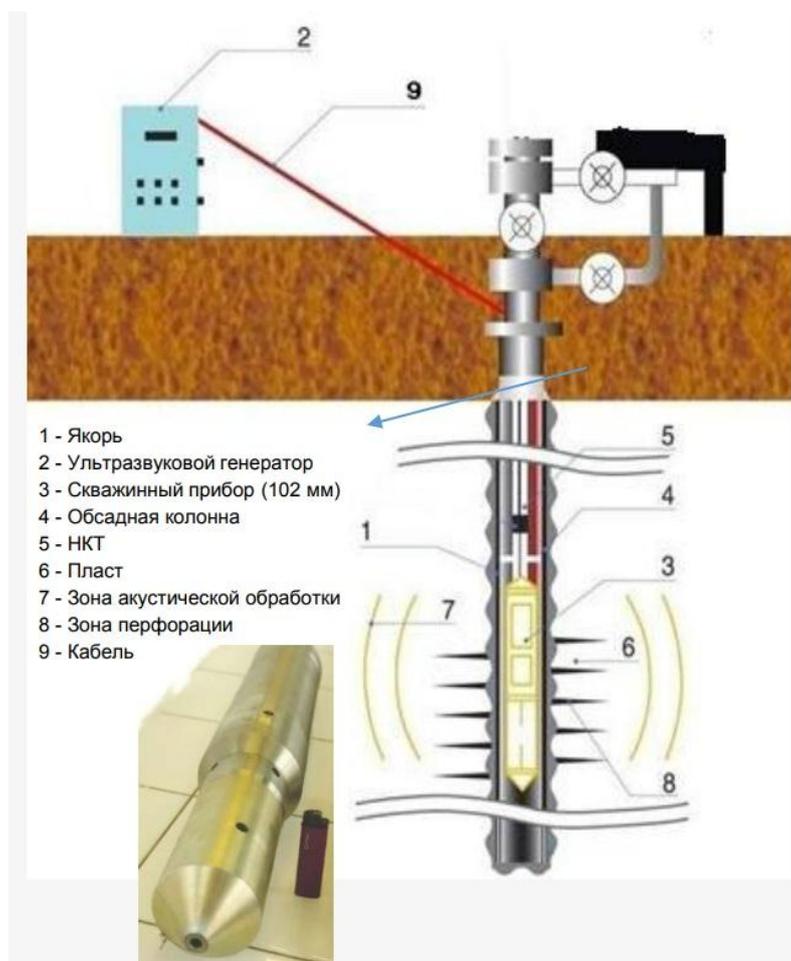


Рисунок 1.3 – Схема ультразвуковой обработки скважин на постоянной основе

В работе [6] приводится сопоставление результатов стендовых испытаний по ультразвуковому воздействию, проведенных при помощи пьезокерамических и магнитострикционных излучателей, в ходе которых установлено, что более эффективными являются излучатели первого типа (разработка ООО "ВИАТЕХ", рисунок 1.4). Разработанная система позволяет создавать в интервале продуктивного пласта колебания с рабочими частотами 15-24 кГц, мощностью до 2кВт, при максимальном напряжении 250 В и входных токах от 4 до 5А.



Рисунок 1.4 – Конструкция пьезоэлектрических преобразователей

Также авторами статьи приводятся данные об успешной обработке скважины №4882 пласта АВ(1-2) Самотлорского месторождения (рисунок 1.5).

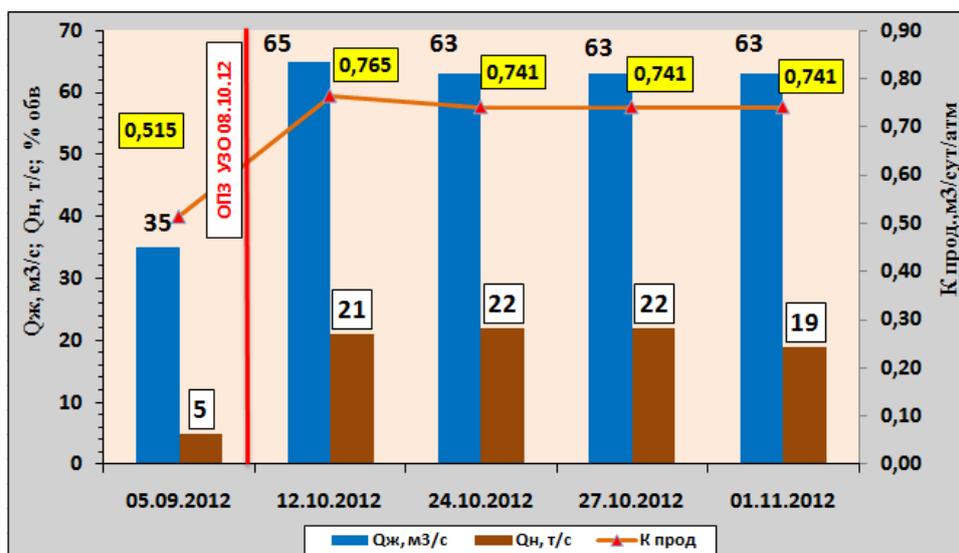


Рисунок 1.5 – Показатели работы скважины 4882 до и после УЗО

Доцентом кафедры Кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи, к.т.н. Халимом Назиповичем Музиповым в своей диссертационной работе [7] приводятся следующие особенности применения ультразвука для интенсификации добычи нефти:

1. Высокие сжимающие и растягивающие градиенты давления в масштабе, соизмеримом с масштабом размера пор.
2. Возможность локального и направленного воздействия на определенные области продуктивного пласта.
3. Отсутствие разрушающего воздействия на пласт и цементный камень.
4. Совместное воздействие на пласт тепловым полем и знакопеременным градиентом давления.

Кроме того, Музипов Х.Н. поясняет, что в среде, находящейся под воздействием акустического поля высокой частоты, происходит дегазация и

кавитационные явления, повышается скорость процессов кристаллизации и десорбции, а также других физических процессов.

В своей работе Музипов Х.Н. предлагает конструкцию преобразователя низкочастотных шумов скважины в ультразвуковое поле при помощи принципа работы резонатора Гельмгольца, представляющего собой сосуд, соединяющийся с внешней средой посредством небольшого отверстия или трубки. Промысловые испытания разработанной автором технологии показали прирост дебитов нефтяных скважин до 34,5 %. Как отмечает сам автор, данный результат вызван изменением структуры жидкости и ранним разгазированием, приводящим к возникновению эффекта газлифта.

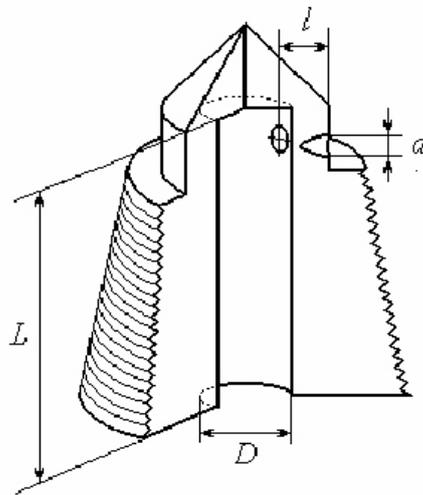
Известен ультразвуковой гидроакустический комплекс для повышения дебита нефтяных скважин, разработанный В.Н. Хмелевым, Р.В. Барсуковым и соавторами в Бийском технологическом институте Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, который состоит из электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы (рисунок 1.6) [8]. Элемент 1 соответствует рабочей излучающей части, 2 – отражающая частотопонижающая накладка, 3 – рабочая частотопонижающая накладка, 4 – пьезоэлектрические элементы. Представленная ультразвуковая колебательная система обладает следующими техническими характеристиками: рабочая частота – 23,12 кГц, акустическая мощность – до 1,5 кВт, интенсивность воздействия до 5 Вт/см², максимальное давление окружающей среды – 250 атм.



Рисунок 1.6 – Ультразвуковой гидроакустический комплекс

Максимовым Г.А. и Радченко А.В. приводятся данные о том, что в результате акустического ультразвукового воздействия температура ПЗП возрастает на 10-12 °С. Нагрев обусловлен диссипацией акустической энергии в пористой насыщенной среде коллектора [9].

Известны устройства для установки в нагнетательные скважины, способствующие повышению приемистости и выравниванию профиля поглощения, представляющие собой вихревой генератор (рисунок 1.7) и гидродинамический вибратор.



L и D - длина и диаметр вихревой камеры; d и l диаметр и длина входного тангенциального отверстия

Рисунок 1.7 – Вихревой генератор акустических колебаний

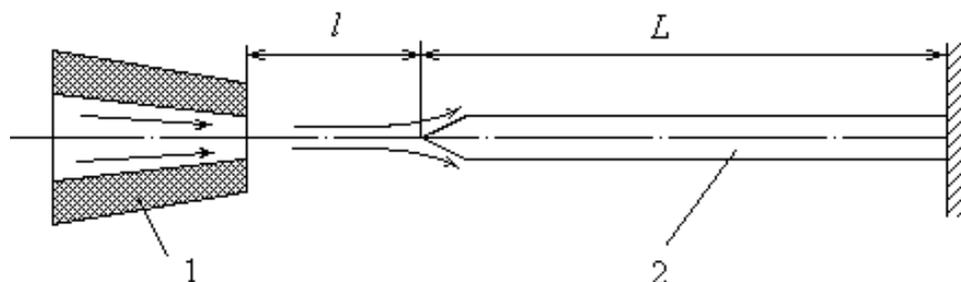
Вихревые излучатели нашли наиболее широкое применение на промыслах ввиду большой надежности и неприхотливости к условиям закачки воды. Корпус генератора включает цилиндрическую камеру, в которой происходят завихрения. Рабочая жидкость подается через тангенциальный канал, а выходит через сопло.

Закрученная в корпусе генератора струя, выходя из сопла, создает импульсы давления с характеристиками, зависящими от скорости потока и геометрических параметров устройства [10]. Рабочий диапазон частот составляет примерно от 500 до 1200 Гц, интенсивность – от 200 до 450 Вт/см².

Повышение акустической мощности происходит вместе с увеличением расхода по жидкости. На коэффициент полезного действия данного генератора

оказывают влияние диаметр сопла на выходе из генератора. При уменьшении диаметра повышается частота колебаний, но снижается мощность [11 – 14].

Гидродинамический вибратор (рисунок 1.8) – это излучатель, состоящий из щелевых прямоугольных сопел и соноправленных в сторону струи пластин, которые находятся в жидкости.



1 - сопло; 2 - пластина

Рисунок 1.8 – Гидродинамический пластинчатый вибратор-излучатель

Пластинчатые генераторы излучают колебания за счет движения пластин, амплитуда которого возрастает ближе к концу пластины. Колебания пластин происходят в плоскости перпендикулярной направлению потока движения жидкости.

В работах [15-17] приводятся данные об использовании звукового воздействия на месторождения Пермского края. Результаты испытаний вибраторов, установленных в нагнетательных скважинах, свидетельствуют о стабилизации процесса нагнетания воды в пласт, увеличении дебита реагирующих добывающих скважин.

В течение семи лет технология гидродинамического акустического излучения применялась на месторождениях Пермнефти и Башнефти и показала эффективность, которая достигалась при предварительной промывке призабойной зоны нагнетательных скважин перед спуском генератора. Было установлено, что без промывок происходило засорение ПЗП нагнетательных скважин во время работы генератора.

Кроме того, отмечается, что, в случае одновременного воздействия в нагнетательных и добывающих скважинах, возможно достичь синергетического

эффекта за счет выноса механических частиц из пласта при небольших пульсациях давления [18, 19].

Существуют промышленные исследования технологии волнового воздействия на пласт Первомайского месторождения при помощи проточного гидродинамического излучателя на основе резонатора Гельмгольца [20]. Частота генерируемых колебаний составляла 7 кГц, амплитуда – 0,1 МПа. После испытаний наблюдалось 9-кратное повышение приемистости нагнетательной скважины, в которой происходило воздействие. Кроме того, было выявлено повышение дебитов нефти расположенных рядом добывающих скважин при сохранении обводненности на прежнем уровне. По другим испытательным участкам выявлено частичное повышение приемистости нагнетательных скважин, дополнительная добыча нефти реагирующих добывающих скважин.

В работах [21, 22] приводятся данные о положительном влиянии акустического воздействия на добычу углеводородов на нефтегазоконденсатных месторождениях. В скважинах №№ 52, 64 Югидского НГКМ, № 104 (дважды), № 108 (дважды), № 105 Печорокожвинского НГКМ, №№ 74, 95 Западно-Соплесского НГКМ, №№ 177, 277, 41, 250 Вуктыльского НГКМ. Всего выполнено 13 скважинно-операций. Конечной целью работ было повышение качества гидродинамической связи пласт-скважина за счет очистки ПЗП скважины от загрязняющих веществ. Для реализации цели были использованы установки: АИС-3 – мобильная аппаратура (ЦНИИ «Морфизприбор»), а также технологический комплекс «Геоакустик» (ООО «ЗВЭК «Прогресс»», г. Ухта, рисунок 1.9).

Данное оборудование характеризуется следующими параметрами: диапазон частот 11 – 30 кГц; приведенная к стенке обсадной колонны скважины ($d=146$ мм) акустическая мощность составляет $0,6$ Вт/см². Дальность проникновения акустической энергии в пласт превышает 3 метра.

Прирост дебита конденсата по некоторым скважинам составлял 233 % (с 1,5 до 5,0 м³/сут).

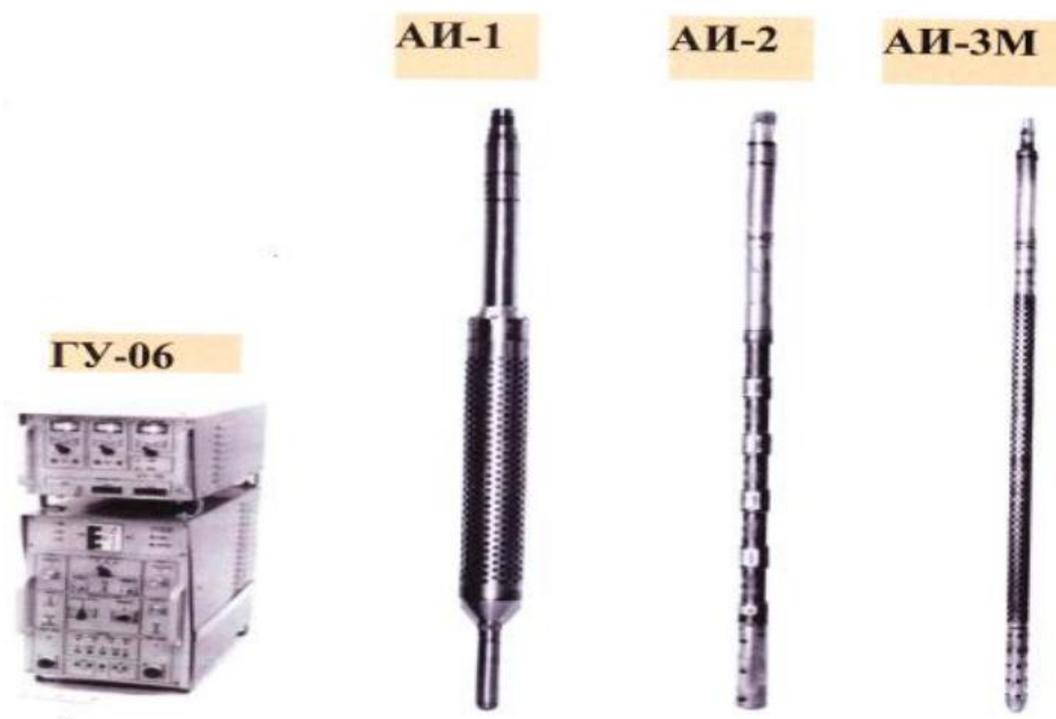


Рисунок 1.9 – Комплект излучающей акустические колебания системы АИС-3

Среди особенностей данного типа воздействия авторы отмечают формирование в околоскважинном пространстве распределенного теплового источника и увеличение температуры пластовой жидкости, что приводит к растворению тяжелых твердых фракций, восстановлению фильтрационных характеристик за счет очистки поровых каналов.

Результаты данных исследований изложены в диссертационной работе Умняева В.Г. под научным руководством к.г.-м.н., доцента Ухтинского государственного университета Зыкова В.А.

Однако в этой же работе представлены результаты неудачного воздействия, примененного на нефтяных объектах Тимано-Печорской провинции. Среди причин нужно отметить наличие в ПЗП высоковязких кольматантов, которые характеризуются высокой степенью сцепления с породой. Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный способ не всегда эффективен на нефтяных объектах.

Проведя анализ результативности выполненных операций по обработке скважин (как добывающих, так и нагнетательных) различными компаниями в разное время, было выявлено, что степень успешности ГТМ достигает 85 %.

Отмечено, что за оценку успешности мероприятия принималась дополнительная добыча углеводородного сырья: нефти или газа. Также следует отметить, что в процессе обработки сильно обводненных скважин (коэффициент обводненности равен или более 0,97) дополнительная добыча нефти не наблюдалась, но дебит жидкости возрастал.

Можно сделать вывод, что оценка эффективности технологии не может быть выражена только в подсчете дополнительно полученной товарной нефти, но и в общем положительном влиянии на фильтрационные характеристики призабойной зоны.

Данная технология скорее повышает гидродинамическую связь между скважиной и пластом, что приводит к вовлечению в процесс разработки областей продуктивного пласта, характеризующихся низкими фильтрационно-емкостными показателями.

Нужно отметить, что на сегодняшний день акустическое воздействие на призабойную зону скважин (в том числе ультразвуковое) — это безреагентный, перспективный, технологичный способ обработки пласта с целью интенсификации притока, повышения приемистости нагнетательных скважин и увеличения нефтеотдачи.

Данную технологию можно использовать для большого числа эксплуатационных объектов с различными геолого-технологическими показателями. Технология отмечена довольно продолжительным (до 24 месяцев) и сильным эффектом. Кроме того, способ акустического воздействия не приводит к разрушению скважины и экологически безопасен, а также его возможно сочетать с другими технологиями повышения нефтеотдачи пласта. Данной метод не является лучшим средством воздействия на изолированные низкопроницаемые интервалы пласта, но при грамотном и детальном анализе показателей работы скважины и строгом соблюдении технологических операций можно добиться улучшения ФЕС, увеличения притока жидкости, повышения нефтеотдачи эксплуатационного объекта.

Таким образом, были сформулированы основные преимущества применения метода:

1. Технологичность: все элементы, задействованные в процессе, легко интегрируются по механической составляющей, а также по электроцепям со стандартным оборудованием геофизических партий и бригад КРС, что облегчает освоение технологии работниками.

2. Мобильность комплекса.

3. Технология не приводит к разрушению эксплуатационной колонны и цементного камня, экологически безопасна как для окружающей среды, так и для задействованного в работах персонала.

4. Не требует применения химических реагентов, таких как кислоты, поверхностно-активные вещества и растворители.

5. Точность применения. Технология позволяет избирательно воздействовать на различные компоненты пластовой системы, учитывая геолого-физические особенности эксплуатационного объекта.

6. Метод воздействия можно контролировать в процессе проведения работ, наблюдая за показателями отклика пласта и изменяя параметры акустического воздействия.

7. Возможность сочетания с другими технологиями воздействия на призабойную зону и пласт в целом для получения комплексного усиленного эффекта повышения нефтеотдачи и интенсификации притока.

Однако технология имеет и ряд оговорок, таких как:

1. Технологический эффект после ультразвуковой обработки продолжается от 3 месяцев до 2 лет.

2. Короткие сроки прогнозирования рентабельности применения технологии в рыночных условиях.

3. Эффект более выражен в терригенных коллекторах.

4. Риски разрушения слабосцементированных коллекторов и необходимость ремонта скважины.

5. Увеличение сроков освоения газовых скважин после обработки ввиду возможности глубокого проникновения в пласт жидкости глушения, необходимой для осуществления акустической обработки.

6. Не рекомендуется применение технологии в коллекторах с высокой глинистостью (более 15%), так как глины разбухают под воздействием высокочастотных колебаний.

7. В скважинах при глубинах порядка 4000 м и соответствующих давлениях в 35 – 40 МПа возможно отсутствие ожидаемого эффекта.

1.2 Методы воздействия акустическими колебаниями на продуктивный пласт с целью повышения нефтеотдачи

Низкие показатели коэффициента извлечения нефти вызваны следующими факторами:

- осложнение вытеснения нефти из поровой среды из-за проявления капиллярных сил;
- разность в вязкостях нефти и вытесняющих ее агентах, что приводит к формированию зон с остаточными запасами;
- наличием геологических неоднородностей по вертикали и площади объектов разработки.

Таким образом, нивелировав воздействие данных причин в процессе разработки, можно повысить нефтеотдачу пласта.

При добыче высоковязких нефтей нужно применять методы, направленные на снижение отношения подвижностей нефти и вытесняющего агента. При наличии высокой геологической неоднородности пласта следует искать возможность повышения охвата заводнением по площади. Если же указанные проблемы не сильно выражены для конкретного объекта, тогда необходимо использовать методы, направленные на снижение влияния капиллярных сил. К таким методам можно отнести воздействие акустическими колебаниями.

В зависимости от расположения источника колебаний все технологии виброакустического воздействия можно разделить на 2 группы:

1) технологии воздействия с поверхности или вибросейсмическое воздействие (ВСВ);

2) технологии воздействия из скважины.

Рассмотрим данные группы подробнее.

1.2.1 Методы повышения нефтеотдачи пласта при помощи вибросейсмического воздействия

Возможность применения колебаний для повышения нефтеотдачи пласта была впервые предложена Кузнецовым О.Л., Симкиным Э.М., Сургучевым М.Л. в 70-х годах прошлого столетия. Исследователями была обнаружена корреляция между произошедшими землетрясениями (Старогрозненское, Колодезное месторождения) и повышением суточной добычи нефти до 45 % [23-25].

Широкий спектр проведенных авторами лабораторных исследований на модели нефтенасыщенного пласта в поле упругих низкочастотных колебаний (1 – 50 Гц) позволяет сделать следующие выводы:

- присутствие акустического поля способствует повышению капиллярного давления, что в свою очередь способствует снижению водонасыщенности;

- акустическое поле низкой частоты способствует внутрипластовому разгазированию нефти в степени, зависящей от амплитуды колебаний и давления насыщения;

- колебательное движение способствует восстановлению связности и фильтрационного течения остаточной фазы.

К первой группе акустического воздействия с целью повышения нефтеотдачи пласта относятся мощные направленные удары с поверхности. Воздействие эффективно в случае неглубоко залегающих залежей нефти.

Вибросейсмическое воздействие (ВСВ) способствует повышению нефтеотдачи из объектов, которые находятся на поздней стадии разработки за счет волнового низкочастотного воздействия.

В описаниях проведенных исследований сообщается, что источники колебаний – вибраторы – устанавливаются в межскважинных зонах и создают на средней глубине залегания продуктивных пластов упругие волны интенсивностью до $1 \cdot 10^{-6}$ Вт/см². Незначительная интенсивность воздействия не препятствует получению положительного промыслового эффекта. Но, также отмечается, что эффект присутствует не во всех случаях, а зависит от геолого-технических параметров объекта воздействия [26].

Были проанализированы результаты экспериментальных исследований по акустическому воздействию на пласт, смоделированный с наличием невыработанного участка нефти [27]. В ходе экспериментов на данную модель пласта воздействовали акустическими колебаниями с частотой 1 Гц и продолжительностью одиночного импульса – 0,1 с.

Полученные результаты свидетельствуют, что при низкочастотном импульсном волновом воздействии на модель обводненного пласта происходит снижение капиллярного сопротивления нефти, что в свою очередь способствует повышению нефтеизвлечения.

В ходе воздействия происходит снижение вязкости, повышение подвижности, снижение влияния капиллярных сил, слияние отдельных капель нефти в крупные конгломераты, что в совокупности способствует изменению фазовой проницаемости по нефти и повышению нефтеотдачи.

Существующие исследования в области применения вибросейсмического воздействия, а также расчеты показывают, что в виброакустическом поле может происходить многократное ускорение гравитационного разделения нефти и воды.

Свалов А.М. в работе [28] разделяет акустическое воздействие на 2 типа. К первому типу относятся технологии, требующие перманентного воздействия на пласт, так как при остановке воздействия система «пористая среда – насыщающий флюид» мгновенно возвращаются в исходное состояние. Ко второму типу можно

отнести технологии акустического воздействия, эффект от которых продолжается даже после прекращения самой акустической обработки. Сюда можно отнести, например, воздействия, приводящие к образованию трещин в пласте.

Необратимые потери импульса виброакустического воздействия в горной породе происходят главным образом из-за того, что он затухает по мере расширения массива, охватываемого полем колебаний. При этом заметно снижается интенсивность воздействия в удаленной от источника колебаний области пласта [29, 30]. В связи с этим трудно спрогнозировать эффекты воздействия на пористую насыщенную среду в отдаленных от излучателя точках.

Критерии эффективного применения ВСВ:

1. Высокая сжимаемость пласта.
2. Большая толщина пласта.
3. Наличие участков с выраженными сводовыми эффектами.
4. Наличие сбросов и выклиниваний.

Чтобы предотвратить отрицательные эффекты, необходимо оценить потенциальные изменения в пласте. Принцип технологии ВСВ заключается в том, что на поверхности располагается источник упругих волн, представляющий собой, как правило, мощную плиту, работающую от гидравлического привода. Чередование подъемов и мощных ударов о поверхность Земли приводит к распространению упругих волн колебаний по направлению к продуктивному пласту (рисунок 1.10).

Технология была испытана на Жирновском, Правдинском, Суторминском, Северо-Салымском, Манчаровском месторождениях.

По объектам бобриковского горизонта Манчаровского месторождения нефтенасыщенная толщина варьируется от 0,8 до 25,6 метров при среднем значении 6,3 метра. Средняя пористость 0,23 д.ед., проницаемость менее 1 мкм². Нефть характеризуется плотностью от 900 до 908 кг/м³, вязкостью равной 52 мПа·с. Остаточные запасы представлены в виде изолированных скоплений капиллярно-удерживаемой нефти.



Рисунок 1.10 – Низкочастотный вибростатистический источник СВ-100/20

В ходе испытаний технологии было проведено 3 цикла обработок, после которых наблюдалось повышение дебита по нефти до 63 % в среднем по месторождению, при снижении обводненности до 93 %. Дополнительная добыча нефти составила 15 тыс. т. Продолжительность технологического эффекта составила 6 месяцев. Радиус эффективного воздействия достигал 3 км от точки генерации колебаний [31, 32].

На Речицком и Березинском месторождениях проводились испытания технологии ВСВ при помощи вибрационных источников СВ-30/120, в ходе которых удалось реализовать мощность воздействия – 150 кВт. В результате воздействия на продуктивные пласты (глубина залегания свыше 2000 м) удалось добыть 5,3 тыс. т дополнительной нефти.

С петрофизической точки зрения принцип возникновения положительных эффектов объясняется следующим образом: в ходе эксплуатации месторождения продуктивный объект деформируется неоднородно, в процессе возникает перенос нагрузки на малосжимаемые области пласта за счёт частичного сжатия других участков – так называемый сводовый эффект. Сводовый эффект способствует

образованию сложнопостроенных областей как в продуктивном пласте, так и в залегающих по соседству породах.

Потенциальная энергия вышележающих пород снижается за счет деформирования массива горных пород из-за пластовых неоднородностей. В идеальных же условиях эта энергия должна способствовать поддержанию пластового давления при переходе ее в энергию упругого сжатия.

Основная идея технологии ВСВ заключается в снижении сводового эффекта и повышении, тем самым порового давления в продуктивном пласте. Таким образом, можно сделать вывод, что вибросейсмическое воздействие оказывает влияние не на процессы фильтрации как таковые, а на распределение горных напряжений. Фильтрация, в свою очередь, повышается за счет увеличения порового давления, вызванного высвобождением накопленной в горном массиве энергии неоднородного деформирования. Повышение пластового давления и его перераспределение по пласту приводит к интенсификации фильтрации пластовых флюидов. При воздействии происходит разгрузка локальной области, которая находится непосредственно вблизи источника колебаний, однако, затем происходит распространение волны давления в масштабах, зависящих от геологических неоднородностей конкретного объекта разработки (эффект может распространяться на сотни метров).

Однако трудно спрогнозировать эффективность данного метода, управлять результатами его применения. Кроме того, данный метод слабо эффективен для глубоководных продуктивных пластов, а также при наличии большого количества глинистых перемычек, большого коэффициента расчлененности, ввиду гашения, отражения и рассеивания волн упругих колебаний.

1.2.2 Методы повышения нефтеотдачи пласта за счет внутрискважинных источников излучения

Ко второй группе следует отнести воздействие на продуктивный пласт непосредственно из скважины. Сюда относятся различные технические средства,

создающие в системе скважина – пласт упругие колебания различных диапазонов частот с целью очистки призабойной зоны и/или повышения нефтеотдачи.

Исследования, проведенные учеными Бажалуком Я.М., Карпаш О.М., Клымышиным Я.Д., Гутаком А.М. и Худиным из Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, говорят о том, что наиболее эффективным воздействием на пласты являются импульсы давления с частотой в диапазоне от 1 до 50 Гц при интенсивности колебаний на входе в пласт от $1,2 \text{ Вт/см}^2$ для обеспечения повышения фильтрационных характеристик нефти на расстоянии не менее 100 метров от скважины, из которой проводится излучение [33].

Авторами рассчитаны параметры воздействия на пласт из скважины при помощи гидрогенератора ГКП-56 (разработка фирмы "ИНТЕКС"). Гидравлическая мощность излучателя колебаний равна 16 кВт, а коэффициент преобразования гидравлической энергии в акустическую – 18,3 %. Акустическая мощность излучателя равна 2,93 кВт.

Теоретические расчеты и практические исследования говорят о том, что для воздействия на удаленную область пласта необходимо создание акустических волн значительно меньшей частоты, чем для воздействия на ПЗП. Это связано с поглощением высокочастотного спектра вблизи скважины.

По результатам комбинированных обработок, проведенных ОАО «АНК «Башнефть» [34] в 123 скважинах при помощи низкочастотных акустических колебаний, создаваемых гидродинамическими скважинными генераторами, дополнительно получено 95,4 тыс. тонн нефти.

В работе "Воздействие акустического поля на фильтрацию двухфазной жидкости в пористом коллекторе" Черемисин А.Н. обосновывает, что остаточная нефтенасыщенность поровой среды может быть снижена при воздействии акустическими колебаниями с частотами от 300 до 3000 Гц, подбираемыми в зависимости от свойств коллектора. Эффект возникает за счет увеличения фазовой проницаемости без изменения градиента давления в пласте [35].

Также в работе доказано, что при правильном подборе частот и мощности излучателя, направления распространения волн, размещения источника к геолого-физическим характеристикам объекта разработки эффективность воздействия повышается [36].

Также автором приведены результаты акустического воздействия на объекте Самотлорского месторождения, в ходе которого сначала путем высокочастотной, а затем низкочастотной (частота 100 – 400 Гц, мощность 6 кВт) обработки наблюдалось снижение обводненности скважины с 50 % до 35 %. Данный результат наблюдался на протяжении всего периода работы низкочастотного внутрискважинного источника колебаний. После его отключения обводненность вернулась к прежнему уровню в короткий срок.

Данные результаты свидетельствуют о том, что в ходе обработки происходило вовлечение в фильтрацию ранее не дренируемой нефти.

Существует технология воздействия на пласт инфразвуковыми колебаниями при помощи внутрискважинного гидровибратора [37]. При помощи инфразвукового гидровибратора можно воздействовать на 1 метр вскрытой мощности продуктивного пласта. Гидровибратор генерирует мощные импульсы давления с рабочей частотой от 0,05 до 0,2 Гц. Поэтапная обработка каждого интервала пласта (начиная с самого нижнего) продолжается от 0,5 до 5 часов в зависимости от его свойств. После проведения каждого этапа генератор поднимается на 1 метр для воздействия на следующий интервал пласта.

В ходе воздействия динамическая импульсная волна проникает в пласт на расстояние свыше 600 метров от скважины. При этом происходит снижение вязкости пластовой жидкости, снижение сил поверхностного натяжения, что приводит к повышению скорости фильтрации.

Для испытаний гидровибратора были выбраны 3 скважины, вскрывающие объект горизонта D2vb (глубина залегания 3300 м, мощность 10 м), отличающийся низким коэффициентом проницаемости (до $9,9 \cdot 10^{-3}$ мкм²) и пористостью (11,1 %). Скважины уже несколько лет находились в бездействии по причине отсутствия дебита из-за снижения пластового давления в 3 раза от

начального. После проведения 24-часовой обработки наблюдалось повышение приемистости до 6,6 раз. Далее в процессе освоения были получены притоки и даже выбросы нефти.

Заявленное устройство имеет множество аналогов, однако, принципиальные отличия их друг от друга несущественны.

Можно сделать вывод, что технологии акустического воздействия на пласт из скважины недостаточно развиты в силу того, что не до конца изучен процесс распространения акустической волны в пласте, не сформулированы критерии применимости технологии. Ввиду этого целесообразно провести исследования распространения акустических волн в насыщенном коллекторе, учитывая их наложение, возникновение нелинейных эффектов, влияние на пластовое давление и возможность управляемого точечного воздействия на области, в которых сосредоточены остаточные запасы углеводородов.

1.3 Классификация технических средств для реализации технологии акустического воздействия на нефтяные пласты

Большое многообразие технических устройств для обработки пласта упругими колебаниями можно классифицировать относительно способа излучения волн (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация погружных излучателей упругих волн

Группа устройств	Способ излучения волн	Диапазон частот, Гц	Интенсивность
Электрические	Использование электрической энергии (пьезоэлектрические, магнитострикционные и др.).	0,001 - 24 000 Гц	5 Вт/см ²
Гидродинамические	Гидродинамические эффекты в потоке жидкости (вихревые, тороидальные и др.).	50 - 35 000 Гц	до 450 Вт/см ²
Импульсные	Электрический разряд в жидкой среде, пиротехнические, энергия гидроудара при разрыве мембраны.	0,001 - 1000 Гц	до 300 кВт/м ²
Импульсно-струйные	Импульсы давления (шариковые, золотниковые, клапанные).	10 - 6000 Гц	до 100 кВт/м ²

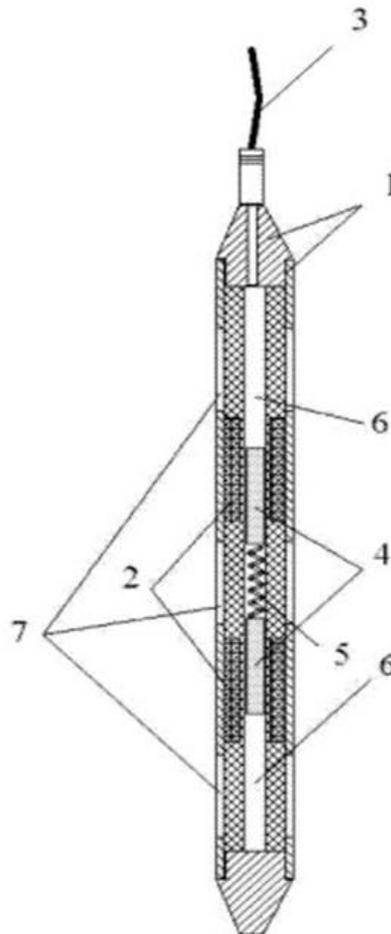
Каждый из представленных выше типов имеет свои преимущества и недостатки.

Электрические

К данному типу относятся устройства, преобразующие электрическую энергию, подводимую по кабелю в скважину, в энергию упругих колебаний. Данный тип устройств способен генерировать мощные волны заданной интенсивности и частоты непосредственно в зоне перфорации.

Способ преобразования энергии может быть основан на принципах магнитострикции или пьезоэлектрическом эффекте.

Далее рассмотрено устройство и принцип работы кабельного инфразвукового гидровибратора (рисунок 1.11) [37]. Инфразвуковой диапазон излучения характеризуется наибольшей проникающей способностью.



1 - корпус; 2 - катушка; 3 - геофизический кабель; 4 - поршень; 5 - пружина; 6 - полость;
7 - отверстие.

Рисунок 1.11 – Схема внутрискважинного инфразвукового гидровибратора

Кабельный инфразвуковой гидровибратор характеризуется высокой мощностью, способностью создавать многократно повторяющиеся гидроудары с дозвуковой частотой импульсов, что способствует глубокому проникновению в пласт колебательных волн.

Кабельный гидровибратор может быть подключен к геофизическому кабелю. Рабочие элементы устройства выполнены в виде магнитных поршней, между которыми расположена сжатая пружина. Все рабочие элементы размещены в корпусе внутри катушки. Катушка может содержать 2 и более секций, которые последовательно располагаются в корпусе гидровибратора.

Рассматриваемый внутрискважинный излучатель состоит из корпуса (1), в полости (6) которого располагаются два магнитных поршня (4) с высокой коэрцитивной силой, и пружины (5), которая расположена между поршнями.

В области пружины и в концах корпуса расположены промывочные отверстия (7). Магнитные поршни размещаются внутри катушек (2). Питание катушек осуществляется через геофизический кабель (3), подключаемый к бортовой сети геофизического подъёмника. Катушки могут состоять из 2 или 3 секций, расположенных так, чтобы генерируемые ими при пропускании электрического тока магнитные поля были направлены навстречу друг к другу.

Принцип работы гидровибратора заключается в спуске и установке его промывочными отверстиями напротив обрабатываемого интервала скважины. Промывочные отверстия служат связующим звеном между внутренней полостью излучателя и скважиной. Через одни отверстия происходит забор скважинной жидкости внутрь корпуса гидровибратора, а через другие – высокоскоростной импульсивный выброс этой жидкости обратно в скважину. Управление импульсами осуществляется через сигналы, подающиеся с поверхности. Ток создает на катушках магнитное поле, которое толкает поршни из катушек навстречу друг другу с высокой скоростью (до 1,5 км/сек). Двигаясь навстречу, поршни выталкивают жидкость из полости корпуса гидровибратора. В это же время скважинная жидкость через концевые промывочные отверстия проникает в полость устройства. Далее под действием пружины поршни начинают движение в

противоположных направлениях. На этой стадии жидкость выталкивается поршнями через верхние и нижние отверстия генератора, а поступает в корпус через средние. Когда поршни достигают крайних точек, на катушки снова подаётся электрический ток и цикл повторяется. Во время движения жидкости из скважины в корпус происходит очистка порового пространства ПЗП, а во время гидроудара – распространение импульсов давления в пласт, что приводит к формированию микротрещин в поровой среде. Таким образом, в ходе обработки может быть существенно повышена гидропроводность пласта и дебит скважин соответственно.

Гидродинамические

С точки зрения рентабельности производства наиболее интересными представляются устройства, относящиеся к гидродинамической и импульсно-ударной группам, так как их работа возможна без дополнительных устройств при размещении их в нагнетательных скважинах за счет потока закачиваемой в пласт воды.

Класс гидродинамических устройств включает гидравлические преобразователи, такие как ГД 108-УНИ, СГГК и ГАП. Данные преобразователи используют энергию потока жидкости. Устройства данного класса характеризуются созданием высокочастотных колебаний низкой амплитуды при большой потере напора прокачиваемой жидкости за счёт сильного штуцирования потока. Данные устройства трудно поддаются точной настройке колебательных характеристик, подвержены сильному кавитационному износу и характеризуются низкой надёжностью.

Наиболее надёжными являются генераторы на основе вихревых центробежных форсунок [38].

Вихрь может быть рассмотрен в качестве мощного усилителя, обладающего максимальным (свыше 500) коэффициентом усиления относительно других струйных элементов.

Принцип заключается в усилении низкочастотных колебаний за счет закрученного вихревого потока жидкости. Степень усиления и амплитудно-

частотные характеристики будут зависеть от скорости потока, то есть от мощности насосных агрегатов, подающих жидкость в скважину.

Получить вихревой эффект можно, используя, например, 2-ступенчатую центробежную форсунку (рисунок 1.12). Первая ступень служит для подачи жидкости через тангенциальные каналы в камеру для создания вихря. По каналам второй ступени в данную камеру подается жидкость с большим расходом. Общая камера служит для смешения потока с высоким напором и потока с большим расходом, но низким напором.

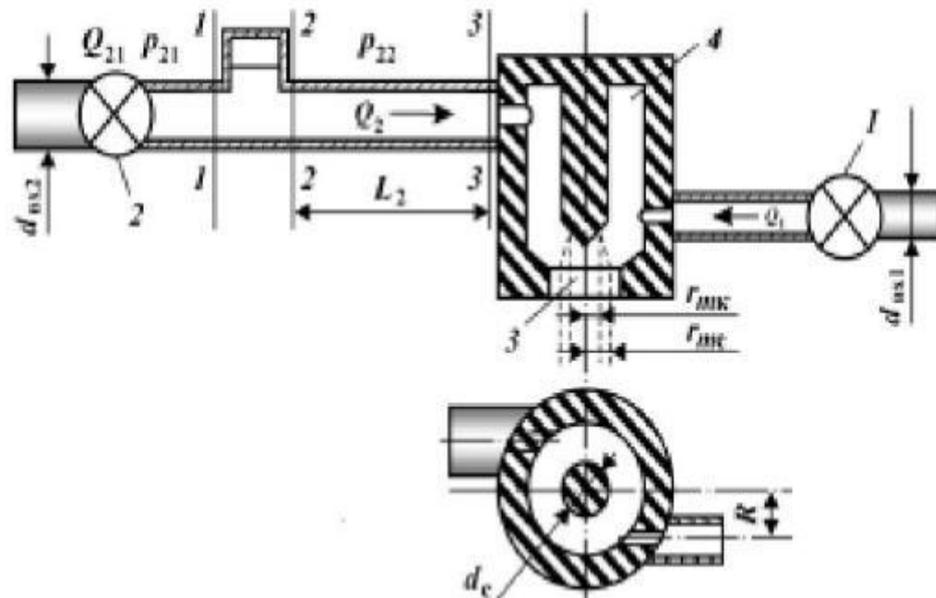


Рисунок 1.12 – Схема истечения жидкости из двухступенчатой форсунки

Гидравлический элемент (4), в качестве которого может быть использована емкость, заполненная газом, размещается на ступени подачи жидкости с большим расходом [39].

Автоколебательный процесс возникает за счет появления в расходной характеристике зоны с отрицательным гидравлическим сопротивлением – это и является главной особенностью рассмотренной конструкции.

Импульсные

Наиболее интересна технология плазменно-импульсного воздействия на призабойную зону пласта, заключающаяся в создании в скважинной жидкости мощного электрического разряда приводящего к многократному мгновенному

локальному повышению давления и температуры и распространению в пласт упругих колебаний практически полного спектра частот [40-43].

Этому сопутствуют следующие явления:

- повышение температуры в призабойной зоне скважины;
- повышение до 1000 раз скорости гравитационной агрегации флюидов;
- повышение фазовой проницаемости по нефти;
- снижение сил капиллярного давления и вытеснение дополнительной нефти;
- формирование микротрещин в породе за счет возникновения сейсмоакустической эмиссии;
- изменение структуры порового пространства ввиду изменения напряженности горной породы.

Применение плазменно-импульсного воздействия (ПИВ) способствует повышению проницаемости призабойной зоны, что улучшает качество гидродинамической связи между пластом и скважиной за счет формирования новых фильтрационных каналов и очистки существующих (рисунок 1.13).

Первородная ударная волна, формируемая в полости плазменного излучателя, проникает через перфорационные отверстия в пласт, быстро диссипируя в множество колебаний с разными частотами и амплитудами.



Рисунок 1.13 – Технология плазменно-импульсного воздействия

Импульсно-струйные

Класс импульсно-струйных устройств включает вибраторы золотникового типа ГВЗ-108 [44]. Рабочая частота такого устройства зависит от количества прорезей и скорости потока прокачиваемой жидкости.

Конструкция данного вибратора получила широкое промышленное внедрение для воздействия на ПЗП, благодаря высокой амплитуде генерируемых колебаний и возможности регулирования частоты путем установления требуемого расхода жидкости. К недостаткам данного устройства можно отнести осложнения, возникающие при работе в загрязненных условиях и агрессивных средах. Зазор между ротором и статором забивается твердыми частицами и выходит из строя уже после 2-3 обработок. Кроме того, чтобы повысить эффективность работы устройства, необходимо уменьшить кольцевой зазор, что абсолютно несовместимо с сохранением надежности и работоспособности устройства в загрязненных средах. К частым поломкам относятся: износ подшипниковых элементов, абразивный износ ротора, заклинивание, разрушение статора, что приводит к увеличению расхода по жидкости и снижению амплитуды генерируемых колебаний и полному выходу устройства из строя.

Вибратор типа ГВЗ-108 характеризуется низким КПД, поэтому зачастую для его работы необходимы дополнительные мощности от устьевых насосов, что ограничивает возможность совместного его использования с другим оборудованием, например, струйными насосами или устьевым компрессором для проведения вибропенных обработок.

Выводы по разделу 1

1. Методы повышения нефтеотдачи пласта являются необходимым средством поддержания добычи углеводородного сырья и повышения КИН, особенно ввиду роста доли трудноизвлекаемых запасов.

2. Акустические методы увеличения нефтеотдачи зарекомендовали себя как перспективные способы интенсификации притока за счет увеличения продуктивности коллектора, а также в качестве методов увеличения нефтеотдачи за счет вовлечения в разработку ранее не дренируемых участков пласта,

капиллярно-удерживаемой нефти, агрегации мелких капель пластовых флюидов в более крупные конгломераты.

3. К наиболее перспективным можно отнести устройства на базе импульсно-струйных и электрических аппаратов.

4. Отсутствует информация о применении технических средств, использующих негармонические акустические колебания.

5. Для лучшего понимания физики процесса необходимы лабораторные исследования явлений, возникающих в насыщенных поровых средах под воздействием акустических колебаний с различными характеристиками.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

2.1 Краткий обзор экспериментальной базы исследований акустического воздействия на насыщенные поровые среды

Свой вклад в развитие теории акустического и виброволнового воздействия на насыщенные поровые среды внесли академики Ганиев Р.Ф. и Кузнецов О.Л., ученые Марфин Е.А, Музипов Х.Н., Дыбленко В.П. и другие. Под руководством Ганиева Р.Ф. образован не один научный коллектив последователей его идей в разных областях промышленности и нефтяной отрасли в том числе.

Как утверждает президент общероссийской общественной организации «Российская академия естественных наук» Кузнецов О.Л., изучение волновых процессов, происходящих в пористой насыщенной несколькими фазами среде, позволяет создавать совершенно новые технологии повышения эффективности выработки запасов углеводородного сырья, открывая новый взгляд на процессы, происходящие на микро- и макроуровне в акустическом поле [23]. Являясь автором множества работ в данном направлении, Олег Леонидович Кузнецов вместе с единомышленниками создал и успешно использовал сложную аппаратуру для экспериментальных исследований акустического воздействия, провел большое количество промысловых испытаний, запатентовал наиболее эффективные технические средства для реализации технологий повышения нефтеотдачи пласта и интенсификации притока. Сами авторы утверждают, что сформированная ими теоретическая база окажется полезной главным образом для специалистов, занимающихся разработкой и внедрением новых методов повышения продуктивности скважин и нефтеотдачи пластов.

Академиком Ганиевым Р.Ф. заложены основы нелинейной волновой механики, являющейся новым словом в инновационных методах воздействия на пласт и призабойную зону [45 – 47]. Позднее Саэтгараевым Р.Х. в диссертационной работе [48] были рассмотрены возможности использования

эффектов нелинейной волновой механики для преобразования вибрационных процессов в односторонне-направленное движение. Данный эффект можно использовать для очистки призабойной зоны пласта за счет создания направленного движения засоряющих частиц и их удаления [49, 50]. Также автор утверждает, что образуемая в поле упругих колебаний вибрационная сила будет воздействовать на частицы с разными плотностями по-разному, что позволяет говорить о возможности управлять местоположениями скоплений этих частиц путем подбора частоты и амплитуды.

2.1.1 Физические основы акустического воздействия на насыщенные поровые среды

Физическими эффектами, возникающими в акустическом поле, изучение которых важно для разработки эффективных методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации притока, являются повышение скорости фильтрации жидкости в поровой среде, повышение проницаемости, снижение вязкости флюида. Теория вибрационного воздействия вводит понятие вибрационной силы, действующей на единичный объем в поле упругих колебаний.

На рисунке 2.1 схематично представлена объективная картина возникновения такой силы, которая, в сущности, является результирующей силой, появляющейся при наличии асимметрии рассматриваемой системы.

Доктор наук Кузнецов О.Л. выделяет 4 вида подобных асимметрий:

I. Силовая асимметрия.

- 1) Постоянная сила T .
- 2) Наклон плоскости относительно горизонта.
- 3) Различие по модулю сил сопротивления движению F .

Стрелки x показывают, что колебания абсолютно симметричны и происходят по гармоническому закону (рисунок 2.1).

II. Кинематическая асимметрия.

Асимметрия траектории вибраций точек поверхности или закона движения вдоль этой траектории. В качестве примера приводятся гармонические колебания по прямолинейной траектории, наклоненной под некоторым углом.

III. Градиентная асимметрия.

Существенная зависимость от координаты x параметров, определяющих движение частицы.

IV. Волновая асимметрия.

Перемещение частицы происходит в направлении распространения бегущей волны или отдельных волн импульсного характера.

Все эти виды асимметрии объясняют появление вибрационной силы. Дальнейшие исследования проводились с учетом этих особенностей.

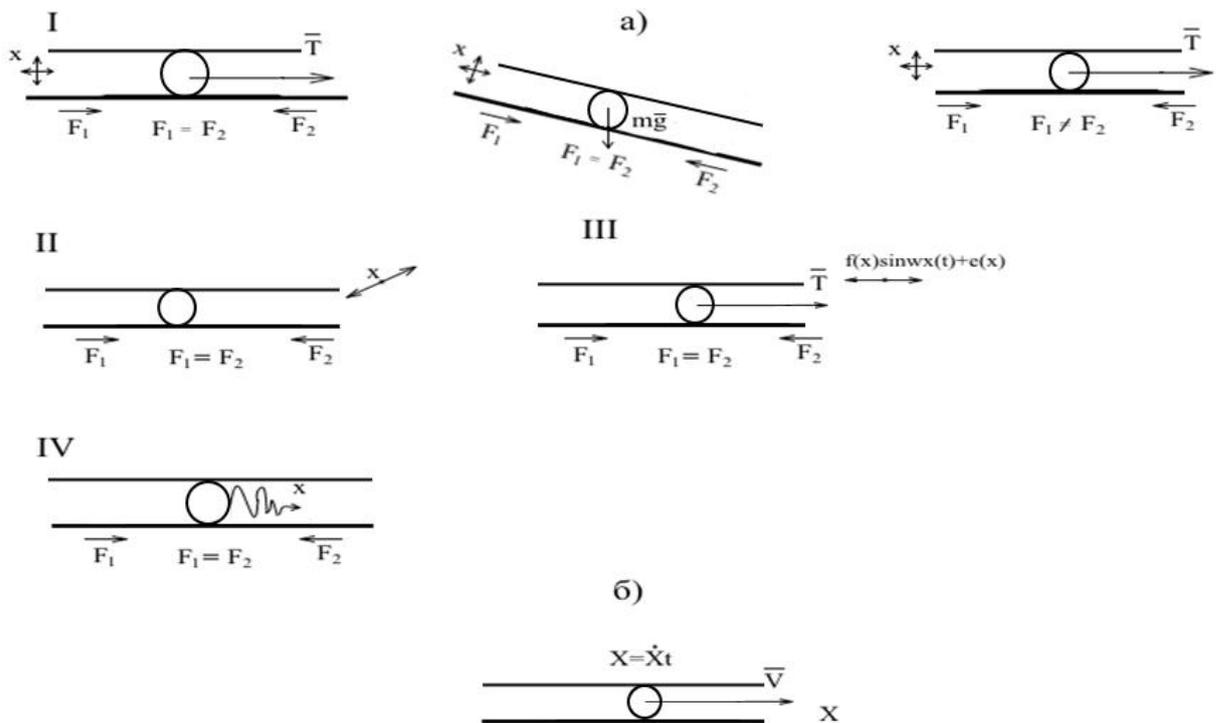


Рисунок 2.1 – а) физическая картина появления асимметрии в поле упругих колебаний; б) введение вибрационной силы V

Можно предположить, что наличие в поровой среде пласта данных асимметрий при наложении колебательного поля способствует возникновению указанных выше эффектов.

Можно заключить, что виброволновое воздействие является перспективным методом воздействия как на призабойную зону, так и на межскважинные области

продуктивных пластов. Это было подтверждено описанием промысловых испытаний, рассмотренных в 1 разделе работы.

Следует отметить, что низкочастотные колебания в несколько раз повышают скорость релаксации механических напряжений. Данный эффект приводит к восстановлению проводимости призабойной зоны после вскрытия пласта бурением, в ходе которого вокруг скважины в горной породе возникают напряженные состояния.

В ходе анализа экспериментальных данных выявлено, что низкочастотные колебания с высокой амплитудой давления (до 30 атм) приводят к повышению абсолютной проницаемости (до 30 %) коллектора. Эффект объясняется формированием новых фильтрационных микроканалов, раскрытием существующих микротрещин, изменением структуры сложения поровой среды зернами в следствие их переупаковки и переориентации [51-54]. Также колебания воздействуют непосредственно на сам насыщающий коллектор флюид и твердые частицы, коагулирующие поровое пространство.

Среди зарубежных работ можно отметить всесторонний обзор лабораторных, теоретических и промысловых исследований ультразвукового воздействия с целью повышения нефтеотдачи, представленный учеными из Великобритании, Малайзии и Ирана [55]. Исследования подтверждают эффективность и потенциал акустического воздействия с целью повышения нефтеотдачи.

Экспериментальные данные свидетельствуют о реологическом изменении вязкоупругих и вязкопластических свойств неньютоновских жидкостей, к которым относится нефть. В работе [12] описаны эксперименты, подтверждающие изменение вязкости нефти в поле упругих колебаний (интенсивность $8 - 100 \text{ кВт/м}^2$, частота – от 20 Гц до 4,5 МГц). После начала воздействия наблюдалось снижение до 30% сдвиговой вязкости нефти, которая полностью либо частично восстанавливалась в течение 5 – 6 часов после окончания обработки. Кроме того, установлена корреляция между степенью

изменения вязкости и содержанием асфальтосмолопарафиновых веществ в исследуемой нефти.

Существующие исследования [10, 12] говорят о дегазации флюидов при наложении поля как низкочастотных, так и высокочастотных колебаний. Дегазация продолжается до достижения нового равновесного значения концентрации (всегда ниже, чем без акустического воздействия). На скорость процесса установления нового состояния влияет частота колебаний, однако, от нее не зависит само его значение.

Это явление может приводить к довольно разнообразному спектру изменений фильтрационно-емкостных характеристик в призабойной зоне пласта, в зависимости от первоначальных условий. Опираясь на промысловые данные, можно заключить, что в целом дегазация оказывает положительное влияние на интенсификацию добычи нефти и процессы освоения скважин.

Авторами исследований акустического воздействия [56] была испытана ультразвуковая обработка нефти с высоким содержанием асфальтенов. В ходе экспериментов установлено, что при 8-минутной обработке ультразвуковым излучением на частоте 45 кГц мощностью 50 Вт происходит 10 % снижение вязкости облучаемой нефти.

Отдельный ряд исследований подтверждает, что, помимо описанных выше эффектов (изменение вязкости, температуропроводности, фазовой проницаемости и др.), в поле упругих колебаний возникают синергетические фильтрационные эффекты, к которым можно отнести многократное повышение скорости фильтрации воды или нефти при пропускании их через насыпные модели или образцы кернов в поле с частотами от 3 до 10 кГц. При наложении поля с частотой 17 кГц (ультразвуковой порог) и интенсивностью 1,9 кВт/м² наблюдалось десятикратное увеличение фильтрационной скорости неполярных и полярных жидкостей, электролитов и диэлектриков [13]. В работе [8] описано практически стократное увеличение фильтрационной скорости дистиллированной воды и солевых растворов при пропускании их через керн в акустическом поле с частотой 26,5 кГц (ультразвук).

Указанные выше эффекты объясняются самими авторами исследований как результат деструкции облитерационных поверхностных слоев, который приводит к повышению диаметра мелких пор, уменьшая, тем самым, гидравлическое сопротивление. Данные эффекты наблюдались, преимущественно, при интенсивности акустического воздействия от 10 до 100 кВт/м² и высокой частотой колебаний (высокие и сверхвысокие частоты).

Однако, опираясь на промышленные данные, описанные в 1 разделе, можно предположить, что для глубокого воздействия на межскважинную область продуктивных пластов большее значение имеют низкоинтенсивные (менее 1 кВт/м²) низко- и среднечастотные волны (частота до 1000 Гц).

В данном случае эффекты от акустического воздействия возникают за счет наличия 2 или 3 насыщающих коллектор фаз, преодоления капиллярных сил, наличия гравитационной силы (под воздействием которой происходит сегрегация диспергированной нефти). В работе [12], например, исследован кинетический гистерезис смачивания, который уменьшается как следствие приложения акустического поля к исследуемой системе, ускоряется капиллярная пропитка, изменяются проницаемости по нефти и воде, повышается скорость проникновения жидкостей в капилляры и трещины, повышается степень вытеснения нефти водой [9, 10, 11, 12]. Начальное термодинамическое состояние исследуемой среды, наравне с характеристиками акустического воздействия, оказывает влияние на степень проявления указанных выше эффектов.

Эффекты будут возможны при превышении прилагаемого к системе акустического поля над требуемым для перехода системы в новое равновесное состояние количеством энергии. Однако если система находится в метастабильном состоянии, то даже маленькое количество (акустическое поле низкой интенсивности) прилагаемой энергии способно дать толчок к ее переходу в новое стационарное состояние [8]. Получается, что наиболее энергетически выгодное воздействие должно осуществляться с учетом наличия метастабильного состояния системы. Такое метастабильное состояние может быть результатом проявления в процессе разработки объектов месторождения капиллярных сил

(капиллярное давление в порах может достигать 0,05 МПа) на границах раздела фаз, скачков насыщенностей и др. [9, 14]. Такие явления могут послужить причиной возможной реакции системы даже на низкоинтенсивные волновые воздействия.

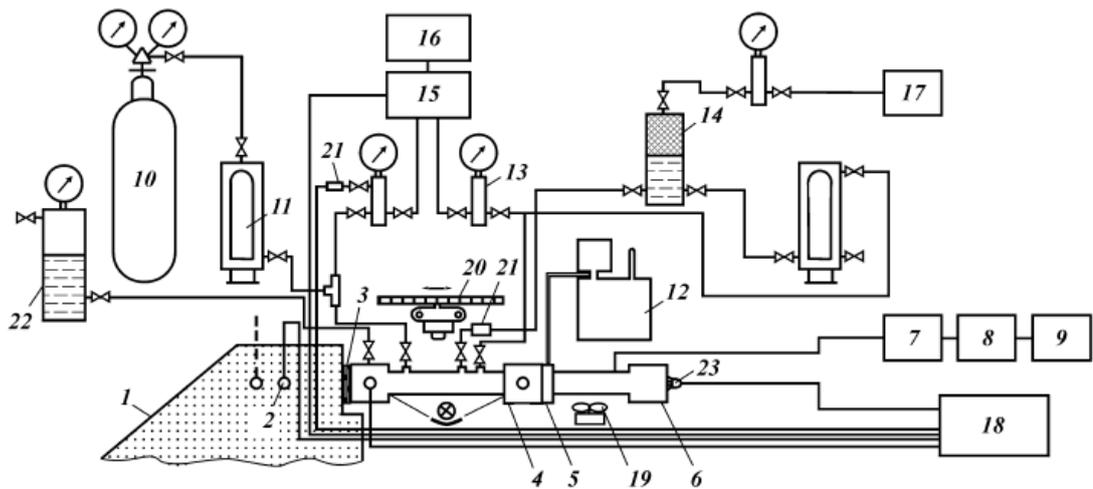
2.1.2 Исследования методов и результатов

проведения экспериментов по акустическому воздействию на насыщенные пористые среды

Как отмечает Дыбленко В.П. [57, 58], существует широкий спектр проведенных исследований в области анализа влияния ультразвуковых колебаний на насыщенные пористые среды, однако низкочастотное воздействие исследовано слабо. Это послужило поводом для создания лабораторной исследовательской установки по акустическому низкочастотному воздействию на образцы насыщенной пористой среды (рисунок 2.2, 2.3).

С целью изучения влияния акустического воздействия на процесс фильтрации были сделаны модели пласта, отличающиеся по проницаемости в диапазоне от 90 до 400 мД. Разработанная лабораторная установка позволяет генерировать волновые колебания в диапазоне частот от 50 до 10^4 Гц при интенсивности поля, составляющей до 500 Вт/м². Через пористую среду (пластинчатую модель пласта) задавали постоянный расход фильтруемой жидкости. После создания постоянного перепада давления начиналось воздействие упругими колебаниями.

В ходе экспериментов использовалась дистиллированная вода, нефть (вязкость 4,2 мПа·с), масло (в качестве моделей нефти).



1 – грунтовой акустический волновод-поглотитель, 2 – датчики упругих колебаний, 3 – пластины согласования волновых сопротивлений, 4 – кернодержатель с пластинчатой моделью пласта, 5 – диск термостатирующий, 6 – излучатель упругих колебаний, 7 – высоковольтный усилитель, 8 – генератор электрических сигналов, 9 – частотомер, 10 – баллон с газом для создания статического давления, 11 – мерник, 12 – термостат, 13 – манифольд, 14 – разделительная колонка (вода, масло), 15 – дифференциальный манометр, 16 – самописец, 17 – плунжерный насос постоянного расхода, 18 – информационно-измерительная система, 19 – вентилятор, 20 – фотокамера, 21 – фильтр, 22 – колонка гидростатической поддержки, 23 – вибродатчик.

Рисунок 2.2 – Схема установки с пластинчатой моделью пласта

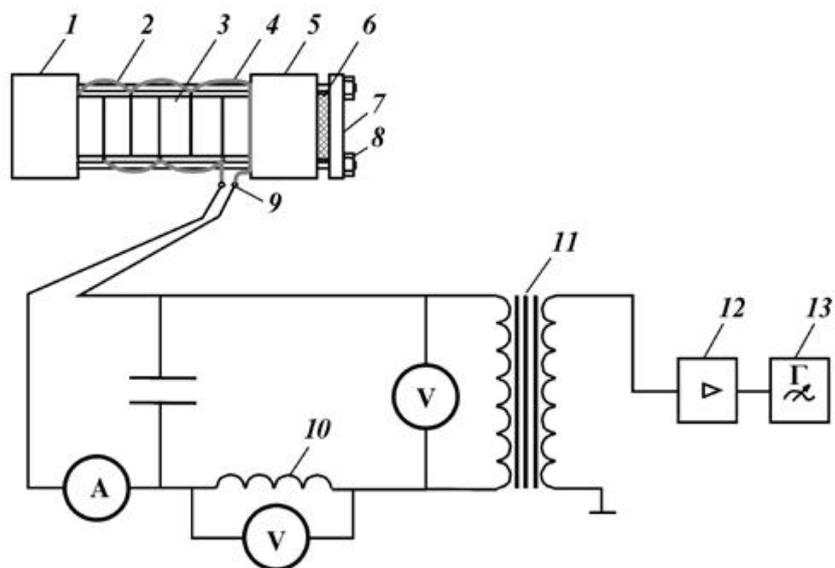


Рисунок 2.3 – Пьезокерамический преобразователь электрической энергии в колебательную

В ходе экспериментов установлено, что наложение поля колебаний тестируемого диапазона не влияет на однофазную фильтрацию воды или масла.

Однако при наличии остаточной заземленной нефти в модели было установлено, что характер фильтрации зависит от колебательного ускорения и смещения.

Кроме того, на данной установке были проведены опыты по воздействию на искусственные и естественные модели кернов. В качестве насыщающих флюидов были использованы: дистиллированная вода и модель нефти, состоящая из вазелинового масла и керосина (плотность 804 кг/м^3 , вязкость $3,42 \text{ мПа}\cdot\text{с}$). Связанная вода составляла $26,2 \%$ от объема пор образца.

В ходе экспериментов было установлено, что колебательное поле с частотой 60 Гц и интенсивностью 46 Вт/м^2 способствует дополнительному вытеснению нефти из пористой среды после прекращения ее извлечения из образца путем вытеснения водой.

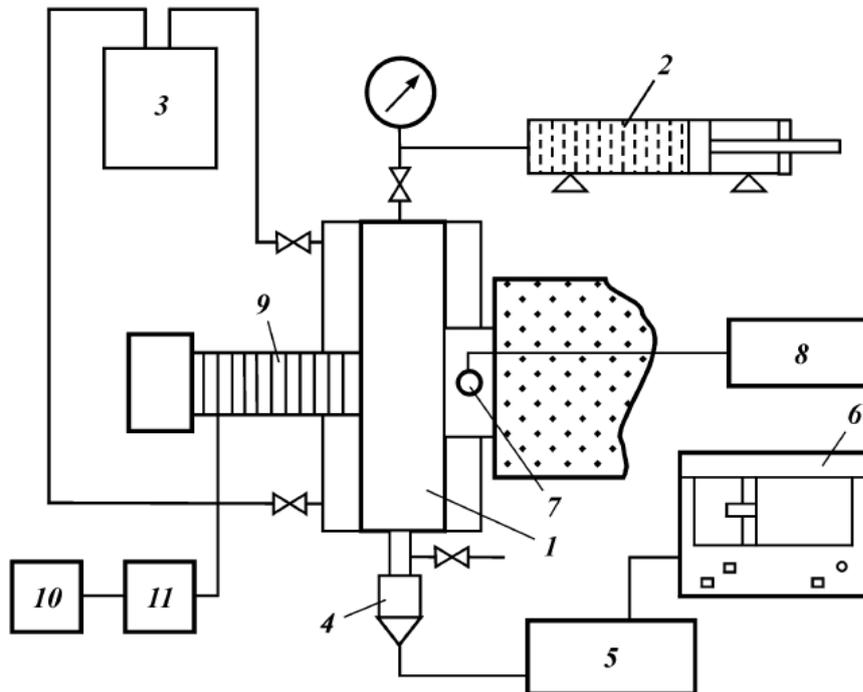
Большое влияние на процессы фильтрации жидкости в пласте оказывают ее реологические свойства, что в большей мере касается наличия неньютоновских свойств у нефти. В работе [57] приводится описание лабораторной установки и метода проведения эксперимента по исследованию влияния упругих колебаний на релаксационные характеристики неньютоновских жидкостей.

На рисунке 2.4 приведена схема лабораторной установки для исследования объемной релаксации неньютоновских жидкостей в колебательном поле.

Эксперименты по воздействию на образцы нефти Мордово-Кармальского месторождения (плотность 937 кг/м^3 , вязкость $395 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) полем упругих колебаний частотой от 20 Гц до 10 кГц показали снижение времени объемной релаксации, которое зависит от величины колебательного ускорения. Данные результаты говорят о разрушении структуры неньютоновских жидкостей в поле упругих колебаний.

Кроме того, под руководством Дыбленко В.П. были проведены исследования влияния поля упругих колебаний на величину времени сдвиговой релаксации неньютоновских жидкостей (полимерных растворов в данном случае). Исследования показали, что время сдвиговой релаксации уменьшается наиболее значительно при низких частотах акустического излучения (950 Гц) даже при низком энергетическом уровне воздействия. Это свидетельствует о

существовании резонансных частот, при которых происходит наибольшее разрушение внутренней структуры неньютоновских жидкостей [55].

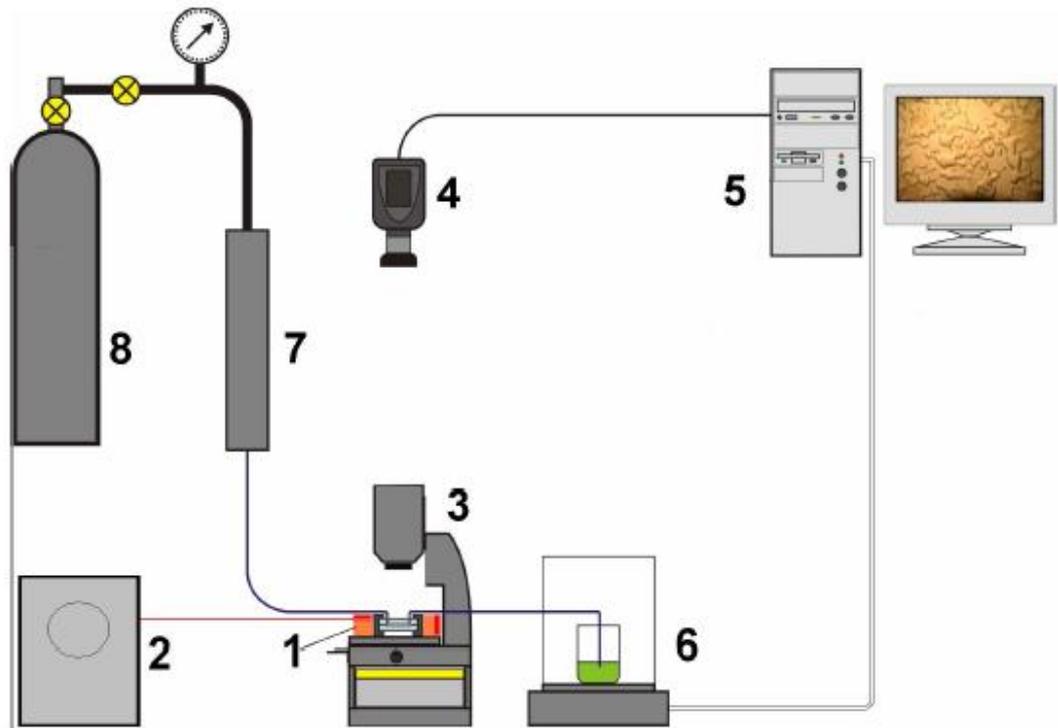


1 – колонка высокого давления, 2 – гидравлический пресс, 3 – термостат, 4 – тензодатчик, 5 – тензометрическая система типа СИИТ-3, 6 – графопостроитель, 7 – пьезоэлектрический датчик ДН-3, 8 – измеритель ВШВ-003, 9 – пакетный пьезоизлучатель, 10 – звуковой генератор типа ГЗ-119.

Рисунок 2.4 – Схема лабораторной установки для исследования объемной релаксации

Авторами [59 – 61] создана лабораторная установка (рисунок 2.5) для вибрационно-акустической обработки поровых структур, в которой в качестве объекта исследований применяется прозрачная двумерная модель горной породы.

Установка позволяет генерировать виброакустическое поле с частотой 1 – 20 000 Гц. Амплитуда вибрирующего элемента достигала 1 мкм. Воздействие осуществлялось на изготовленную фотолитографическим методом прозрачную модель зерна (рисунок 2.6).



1 – пористый образец в термостате, с вибраторами, 2 – генератор, 3 – микроскоп, 4 – цифровая видеокамера, 5 – компьютер, 6 – электронные весы, 7 – ресивер, 8 – газовый баллон.

Рисунок 2.5 – Схема исследовательской установки по акустическому воздействию

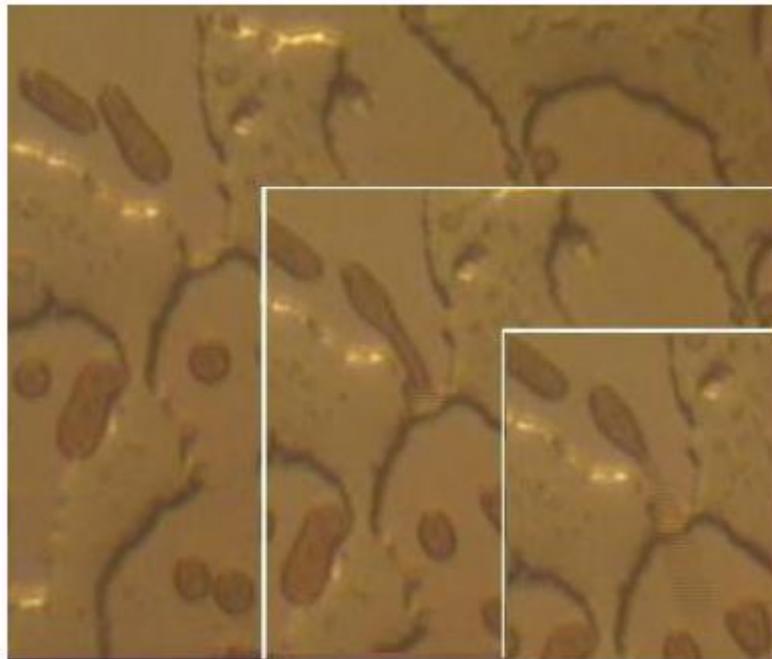


Рисунок 2.6 – Фотография реакции капель нефти в поле упругих колебаний с частотой 2 кГц

На первой стадии эксперимента насыщенная нефтью модель керна была промыта дегазированной водой до полного отсутствия капель нефти на выходе (перепад давления 2 атм, продолжительность прокачки до 5 часов). После чего создавали постоянный расход воды через образец при давлении на входе от 0,05 до 0,2 атм с интервалом в 0,01 атм. При этом происходило наблюдение за состоянием капель нефти в образце.

В ходе экспериментов установлено, что при наложении поля акустических колебаний происходит снижение необходимого для высвобождения заземленной нефти градиента давления. Кроме того, визуальный анализ показал укрупнение частиц нефти в поровых каналах.

Интересным с точки зрения темы данной работы является способ лабораторных исследований проникновения энергии акустических колебаний из скважины в пласт через перфорационные отверстия [62 – 64]. Для этого Марфиным Е.А. была сконструирована модель скважины с перфорационными отверстиями (рисунок 2.7), к которой подключался генератор акустического поля и звукосниматели.

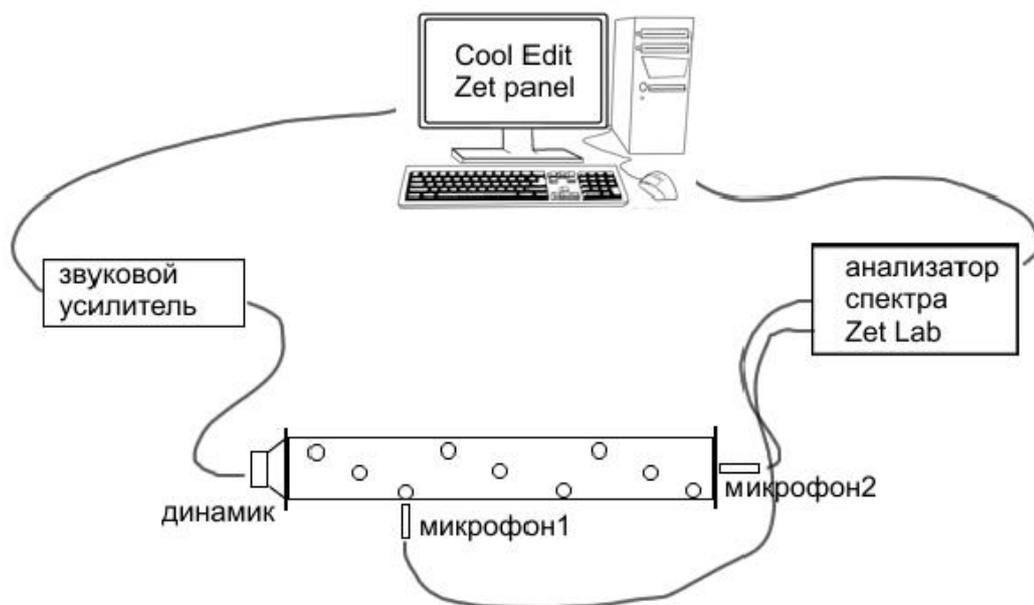


Рисунок 2.7 – Схема экспериментальной установки, разработанной Марфиным Е.А.

В ходе эксперимента были задействованы: микрофоны, усилитель акустического сигнала, анализатор частотного спектра, излучатель (акустический динамик), персональный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Эксперимент проводился путем генерации белого шума посредством излучателя и одновременной регистрации амплитудно-частотных характеристик и полученных сигналов на 2 микрофонах, поочередно переставляя микрофон по перфорационным отверстиям. Используя специальное программное обеспечение, было получено амплитудное распределение сигнала от частоты воздействия.

На рисунке 2.8 приведен график АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) полученный в ходе анализа поля в модели скважины.

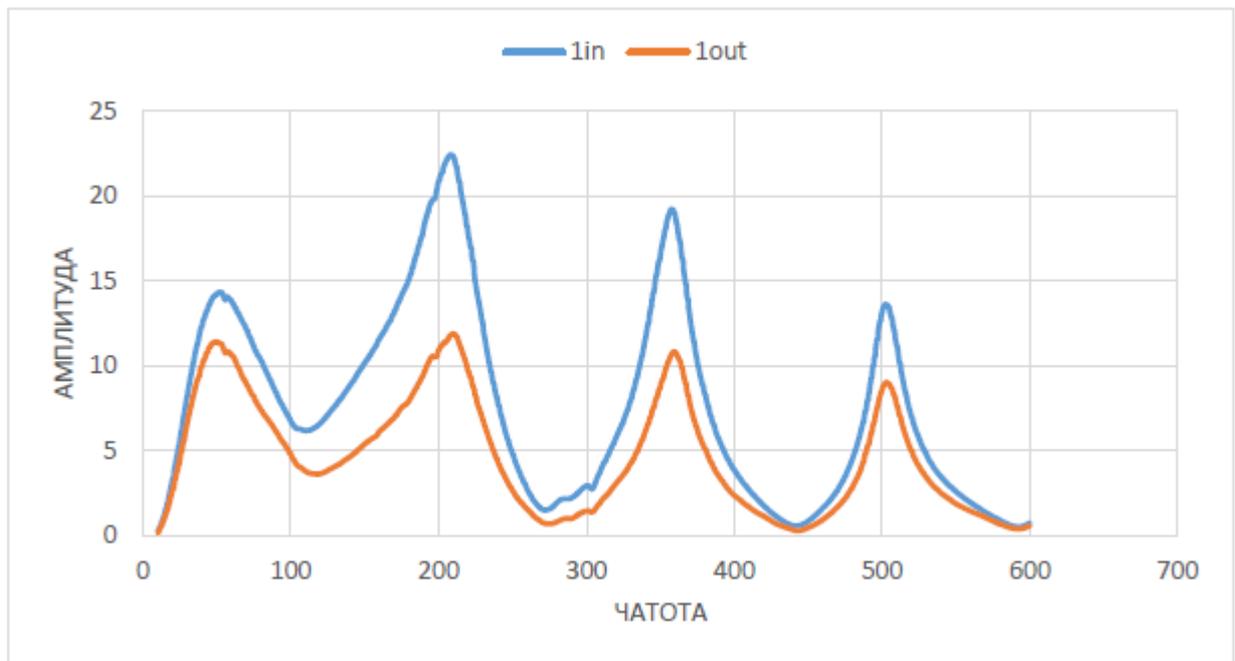


Рисунок 2.8 – График амплитудно-частотной характеристики

В ходе этой серии лабораторных исследований наблюдались сдвиги частот резонанса в зависимости от формы перфорационных отверстий. Кроме того, наблюдалось присутствие первой гармоники, обусловленной наличием перфорации. Эти наблюдения позволяют говорить о том, что при колебаниях с частотами, не совпадающими с резонансными, затухание будет значительным.

Еще одно значимое исследование проведено на лабораторной установке, представленной на рисунке 2.9 [65 – 67].

Исследовательская система включала в себя: вибростенд с устройствами для крепления моделей пласта, гидродинамический вибростенд поперечных колебаний, систему насыщения и систему вакуумирования моделей пласта и жидкостей.

В качестве исследуемых образцов были взяты анизотропные, искусственно сцементированные песчаники. Проницаемость в направлении фильтрационных потоков в несколько раз превышала поперечную проницаемость. Длина образца составляла 1 метр.

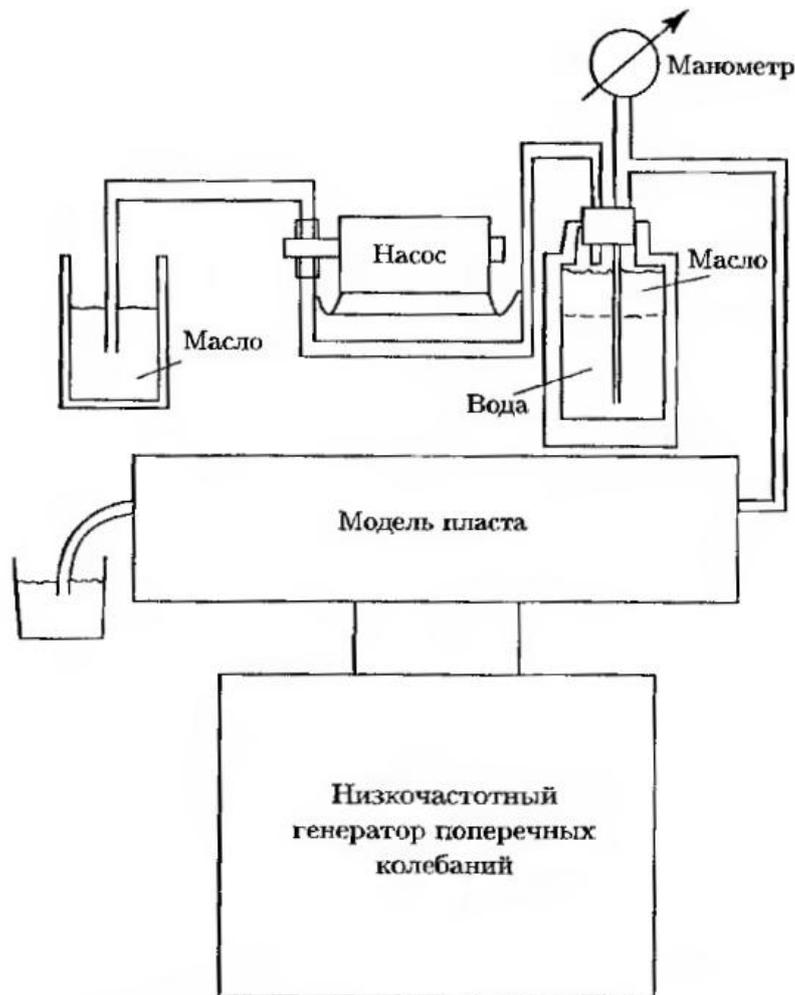


Рисунок 2.9 – Схема лабораторной установки для исследования трехфазной фильтрации в поле колебаний при постоянном расходе жидкости

Для определения остаточной нефтенасыщенности модели были оборудованы электродами, с помощью которых проводилось измерение электрического сопротивления образцов.

В ходе экспериментов по анализу виброакустического воздействия было зафиксировано повышение конечного нефтеизвлечения на 12,6 % при вытеснении нефти водой с растворенной двуокисью углерода. Наибольшие показатели прироста коэффициента вытеснения были достигнуты при воздействии колебаниями с частотой равной 20 Гц. Также в ходе экспериментов по использованию щелочных растворов установлено, что концентрация щелочи слабо влияет на конечный результат дополнительного извлечения нефти. Данное утверждение справедливо для исследованных концентраций от 0,05 % до 0,1 %.

Также на указанной лабораторной установке был проведен ряд экспериментов по воздействию виброакустическими колебаниями на глиносодержащие модели коллектора (терригенные отложения с содержанием глинистых минералов до 15 – 20 %) при вытеснении нефти минерализованной водой с содержанием NaCl от 50 г/л до 200 г/л.

Обнаружено, что воздействие колебательным полем приводит к смещению максимума коэффициента вытеснения от минерализации воды равной 150 г/л. Однако при минерализации воды равной 200 г/л прирост коэффициента вытеснения нефти составил 8,8 % (ниже установленного максимума – 17 %), что позволяет сделать вывод о наличии оптимального значения минерализации вытесняющего агента.

Еще одна группа экспериментов по акустическому воздействию на насыщенную поровую среду показала повышение приемистости модели искусственного керна по минерализованной воде (минерализация 150 – 200 г/л) в 1,45 – 1,64 раза.

Стоит отметить результаты влияния колебательного поля на скорость капиллярной пропитки, полученные в ходе лабораторных экспериментов по воздействию на естественные керны [68]. В качестве объекта исследований были взяты образцы керна Елабужского нефтяного месторождения длиной 26,8 см, диаметром 30 мм. Проницаемость образцов по азоту составляла 1000 мД. В ходе исследований наблюдалось повышение скорости прямой капиллярной пропитки в колебательном волновом поле на несколько порядков.

Также было зафиксировано повышение безводного коэффициента извлечения нефти из образцов.

В 2018 году учеными В. Keshavarzi, М.Н. Ghazanfari, С. Ghotbi из Иранского университета технологий были проведены исследования акустического воздействия на изменение проницаемости при ультразвуковом воздействии на керн, загрязненный асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО).

В результате очистки от АСПО удалось повысить проницаемость образцов до 67 % [69].

Авторами работы [70] приводятся результаты виброакустического воздействия с частотами 20 и 35 Гц с целью повышения нефтеотдачи. В ходе экспериментов зафиксировано повышение извлечения нефти до 52 %, а также увеличение притока нефти на 16 %.

В результате анализа предыдущего опыта лабораторных исследований полученные эффекты были обобщены и представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация опыта предыдущих исследований в зависимости от частоты акустического воздействия

№, п/п	Частота колебаний	Эффекты	Авторы исследований
1	2	3	4
1	Частота 20 Гц	Повышение коэффициента вытеснения нефти водой на 12,6 % за счет извлечения капиллярно-удерживаемой нефти.	Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж., Россия, 2001 г.
2	Частота 60 Гц	Повышение коэффициента вытеснения за счет отрыва пленочной нефти от поровых каналов.	Дыбленко В.П., Россия, 2008 г.
4	Частота 950 Гц	Снижение вязкости нефти за счет воздействия резонансных частот, при которых происходит разрушение внутренней структуры неньютоновских жидкостей.	Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шариффулин Р.Я., Туфанов И.А., Россия, 2000 г.
4	Частота 1000 - 2000 Гц	Снижение критического градиента начала фильтрации.	Губайдуллин А.А., Конев С.А., Саранчин С.Н., Россия, 2010 г.
5	Частота >17 000 Гц	Повышение скорости фильтрации в поровой среде за счет снижения динамической вязкости.	Кныш Ю.А., Лукачев С.В., Россия, 1980 г.

В ходе анализа методов лабораторных исследований в области акустического воздействия не обнаружены данные о воздействии негармоническими акустическими колебаниями.

Исходя из исследования результатов экспериментов акустического воздействия на насыщенные пористые среды, можно сделать следующие выводы:

1. В области низкочастотных акустических колебаний происходит повышение коэффициента вытеснения за счет извлечения дополнительной нефти. Наибольший эффект зарегистрирован при частоте колебаний 60 Гц, интенсивностью 46 Вт/м^2 .

2. На частотах акустической волны от 1,2 до 2 кГц наблюдается снижение необходимого для фильтрации критического градиента давления. Происходит укрупнение частиц нефти в поровых каналах.

3. На частоте 950 Гц происходит наибольшее снижение времени сдвиговой релаксации неньютоновских жидкостей за счет разрушения их внутренней структуры, а воздействие в диапазоне частот от 200 до 800 Гц приводит к 3-х кратному снижению межфазного натяжения на границе раздела нефти и воды.

4. Установлено, что при акустическом воздействии с частотами волн, не совпадающими с резонансными колебаниями поровой среды, затухание энергии будет существенно возрастать с глубиной проникновения.

5. В поле ультразвуковых колебаний регистрируется снижение вязкости жидкости.

6. Скорость капиллярной пропитки возрастает на несколько порядков при наложении поля акустических колебаний.

2.2 Проведение лабораторных исследований

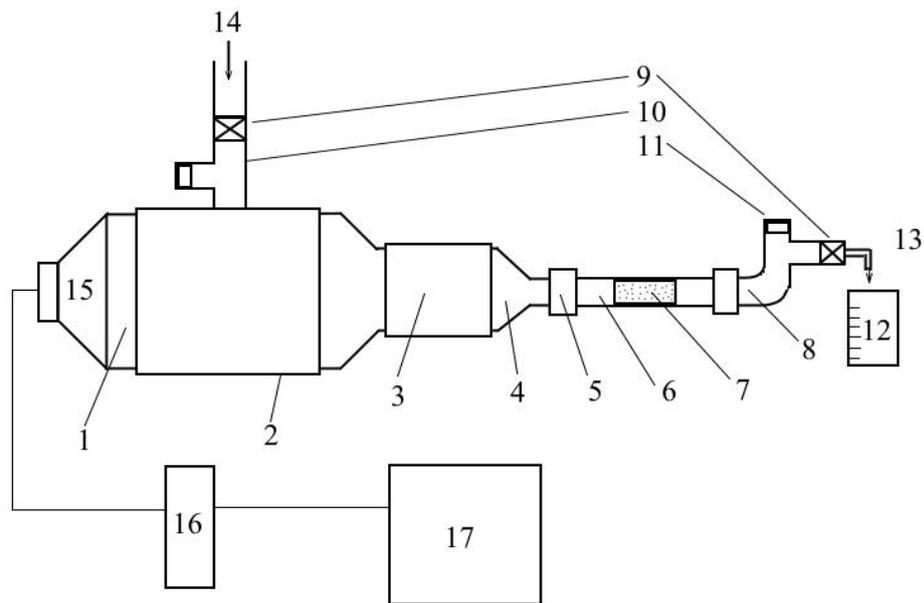
2.2.1 Методологические основы проведенных экспериментов по акустическому воздействию на насыщенные горные породы негармоническими колебаниями

Целью **I группы** экспериментов является установление влияния негармонических акустических колебаний на изменение критического градиента давления начала фильтрации.

Целью **II группы** экспериментов является установление влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности жидкости ($K_{\text{подв}}=k/\mu$).

Целью **III группы** экспериментов является установление влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент вытеснения нефти водой.

Для проведения исследований по акустическому воздействию на процесс фильтрации была разработана и собрана лабораторная установка (рисунок 2.10).



1 – корпус, 2 – компрессионный обжим, 3 – муфта, 4 – переходное соединение, 5 – соединительный фитинг, 6 – сменная гильза с керном, 7 – образец керна, 8 – отвод, 9 – краны, 10 – входной тройник, 11 – выходной тройник, 12 – мерный стакан; 13 – выход жидкости, 14 – подача жидкости в корпус установки; 15 – акустический излучатель, 16 – усилитель акустического сигнала, 17 – компьютер для генерации сигнала.

Рисунок 2.10 – Схема лабораторной установки по негармоническому акустическому воздействию на процесс фильтрации

Установка включает в себя корпус (1), в качестве которого использован переход "SDR11" 110 – 63 мм, а также дополнительные вспомогательные элементы (2, 3, 4, 5, 6, 8), выполненные из полиэтилена низкого давления (ПНД).

Герметичность соединениям обеспечивают резиновые уплотнительные кольца.

Объект эксперимента керн (7) герметично крепится в гильзе (6), в качестве которой используются отрезки полиэтиленовой трубы (ГОСТ 18599-2001) внешним диаметром 32 мм. Толщина стенки составляет 2 мм.

Размещение керна в трубе происходит при ее нагревании до 120 °С. После охлаждения до стандартной температуры полиэтиленовая труба прочно и герметично обжимает керн, полностью исключая фильтрацию жидкости в обход образца.

Сменные гильзы (6) крепятся в системе с одной стороны при помощи соединительного компрессионного фитинга (5) и компрессионного отвода (8) с другой.

Фитинг (5) позволяет герметично соединять полиэтиленовые элементы внешнего диаметра 32 мм. Кроме того, данная конструкция позволяет в кратчайшие сроки удобно извлекать и устанавливать в систему сменные гильзы с образцами керна для проведения исследований.

Компрессионный отвод позволяет установить тройник (11), через который осуществляется выход жидкости из системы для замера ее объема и определения скорости фильтрации.

Краны (9) служат для ограничения при необходимости доступа и выхода жидкости из системы.

Для возбуждения в системе негармонических колебаний заданных параметров используется электродинамический акустический излучатель (15), мембрана которого расположена внутри корпуса установки (1). Сам излучатель герметично прикреплен к корпусу через резиновую прокладку, исключая прямое вибрационное воздействие на лабораторную установку в целом.

Мембрана диффузора динамика выполнена из композитных материалов, устойчивых к контакту с жидкой средой.

Принцип работы динамика заключается в следующем: при подаче электрического сигнала катушка производит вынужденные колебания в поле постоянного магнита под действием силы Ампера, что приводит в движение диффузор, который создает волны сжатия и разрежения в среде, преобразуя тем самым электрические колебания в акустические. Система "диффузор – катушка" совершает колебания с частотой подаваемого напряжения. При изменении амплитуды электрического сигнала изменяется положение диффузора. При высоких частотах колебания совершает только центральная часть динамика, выполненная в форме купола для лучшей передачи волн в среду. Низкочастотные колебания образуются путем движения всей поверхности диффузора.

На рисунке 2.11 представлена фотография лабораторной установки.



Рисунок 2.11 – Фотография лабораторной установки

Для генерации набора акустических волн с определенными амплитудно-частотными характеристиками используется персональный компьютер (17) с установленным программным обеспечением. Для повышения энергии сигнала используется внешний усилитель (16).

2.2.2 Описание и подготовка образцов керна для проведения исследований

Для проведения исследований были отобраны образцы керна, обладающие следующими характеристиками, представленными в таблице 2.2. Образцы керна были исследованы на состав, плотность и абсолютную проницаемость и предоставлены аккредитованной лабораторией.

Каждый образец плотно упакован в полиэтиленовую гильзу. Упаковка образца полностью исключает фильтрацию жидкости вне поровой среды образца, обеспечивая строго торцевое проникновение и продольное движение флюида.

Данные образцы обладают идентичными показателями пористости, но коэффициенты абсолютной проницаемости отличаются. В связи с этим образцы были разбиты на 2 группы:

I группа – образцы с высоким значением абсолютной проницаемости;

II группа – образцы с низкими значениями абсолютной проницаемости.

Таблица 2.2 – Характеристики образцов керна для проведения лабораторных исследований

Номер	Описание	Пористость	Объемная плотность	Насыщ. плотность	Мин. плотность	Абсолютная проницаемость	Тип
п/п	-	д.ед.	г/см ³	г/см ³	г/см ³	10 ⁻¹⁵ м ²	-
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,26	1,97	2,23	2,65	896,65	Высоко-проницаемый
2	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,25	1,98	2,24	2,65	242,15	Высоко-проницаемый
3	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,26	1,95	2,21	2,64	1160,74	Высоко-проницаемый
4	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,27	1,91	2,19	2,63	2322,22	Высоко-проницаемый

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,25	1,97	2,23	2,63	666,73	Высокопроницаемый
6	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,24	2,00	2,26	2,66	6,04	Низкопроницаемый
7	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,24	2,03	2,27	2,68	2,86	Низкопроницаемый
8	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,24	2,01	2,26	2,67	2,41	Низкопроницаемый
9	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,24	2,02	2,27	2,67	1,48	Низкопроницаемый
10	Песчаник светло-серый, среднецементированный, однородный.	0,24	2,03	2,27	2,67	1,44	Низкопроницаемый

Все образцы относятся к песчаникам, обладают пористостью в диапазоне от 24 % до 27 %, плотностью до $2,03 \text{ г/см}^3$. Образцы имеют цилиндрическую форму, длину 30 мм, диаметр 27 мм (рисунок 2.12).

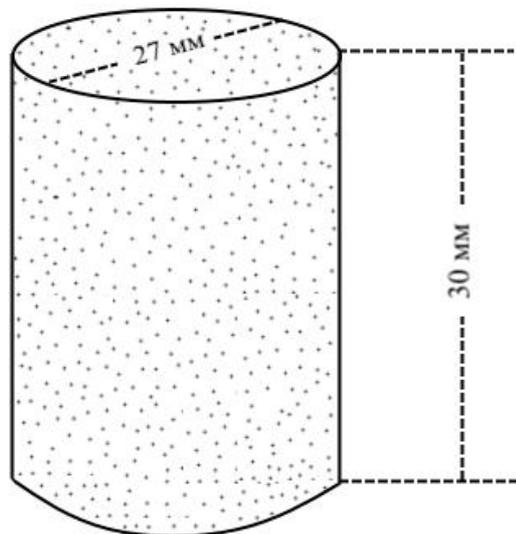


Рисунок 2.12 – Схема образца керны для проведения исследований

Образцы были подготовлены к экспериментам согласно ГОСТ 26450.0-85, ГОСТ 26450.1-85.

2.2.3 Измерение критического градиента давления начала фильтрации

Цель эксперимента: установить влияние воздействия акустическими негармоническими колебаниями на изменение критического градиента давления начала фильтрации воды через образец керна.

Под критическим градиентом давления начала фильтрации понимается такая величина градиента давления, при которой начинается фильтрация жидкости сквозь поровую среду. В классической механике можно сопоставить градиент давления начала фильтрации с силой, которую необходимо приложить к покоящемуся объекту для преодоления трения и приведения его в движение.

В основе экспериментов по оценке влияния акустического воздействия негармоническими колебаниями на изменение градиента давления начала фильтрации лежит закон Дарси.

Существующие исследования применимости линейного закона фильтрации Дарси свидетельствуют о том, что закон не универсален и не соблюдается при больших и малых скоростях фильтрации, а также зависит от реологических характеристик флюида. При малых скоростях течения проявляются неньютоновские свойства жидкостей, поверхностные силы взаимодействия между жидкостью и твердой фазой, а также другие физико-химические явления. Даже ньютоновские жидкости способны проявлять неньютоновские свойства при очень малых скоростях фильтрации в поровой среде. Таким образом, целью эксперимента является установление наличия критического градиента давления начала фильтрации жидкости и оценка влияния на него акустических негармонических колебаний.

Эксперимент проводился следующим образом: на входе жидкости в образец керна создавалось гидростатическое давление, уровень которого постепенно повышался. Зная высоту созданного над входным тройником столба жидкости

относительно расположения образца керна и ее плотность, производился пересчет давления в [Па].

В процессе проведения экспериментов проводилась визуальная регистрация уровня столба жидкости и его пересчет в единицы измерения давления, при котором начиналась фильтрация воды через керн. Увеличение столба жидкости производилось с интервалом в 10 секунд до момента начала фильтрации. В данной последовательности было исследовано 5 образцов. Пример определения критического давления начала фильтрации по одному из образцов представлен на рисунке 2.13.

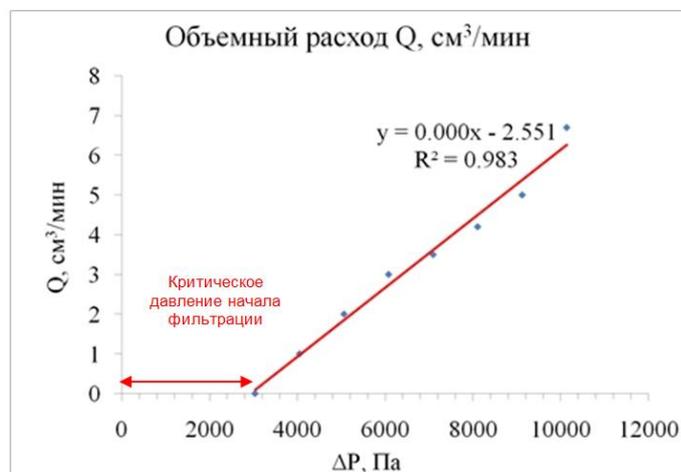


Рисунок 2.13 – Определение критического давления начала фильтрации

Таким образом, были исследованы все высокопроницаемые образцы керна. Результаты определения представлены на рисунке 2.14.

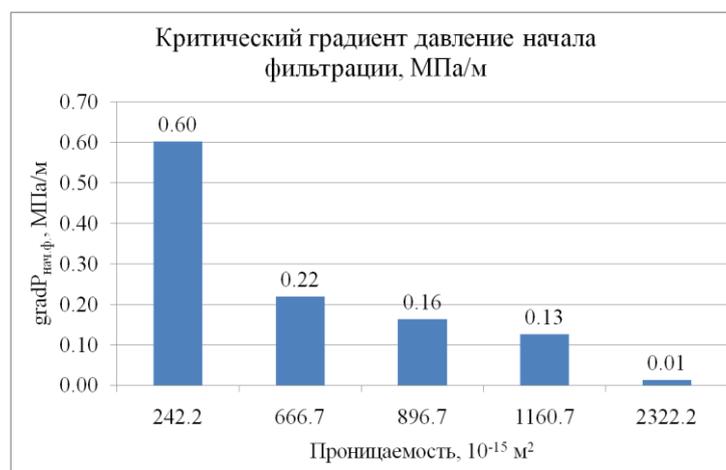


Рисунок 2.14 – Результаты определения критического градиента давления начала фильтрации

График показывает, что значение критического градиента давления начала фильтрации снижается с ростом проницаемости.

Следующим этапом была оценка влияния негармонических акустических колебаний на изменение полученных значений. Для оценки относительной эффективности было исследовано 16 различных типов волны, включающих комбинации 2, 3 и 4 частот из различных диапазонов.

План эксперимента.

1. Насыщение образцов водой.
2. Постепенное увеличение перепада давления на концах образца керна и фиксации начала фильтрации воды без акустического воздействия (далее АВ).
4. Постепенное увеличение перепада давления на концах образца керна и фиксация давления начала фильтрации жидкости через равные промежутки времени при АВ.
5. Расчет критического градиента давления начала фильтрации с учетом длины образца, площади фильтрации, вязкости жидкости и зафиксированного перепада давления.

Чтобы определить эффективность воздействия были поэтапно исследованы акустические колебания, включающие от 1 до 4 гармонических синусоидальных акустических волн в различных комбинациях.

Результаты представлены на рисунке 2.15.

В результате установлено, что негармоническая акустическая волна, включающая 4 частоты из низко-, средне- и высокочастотного диапазона, а также с разными амплитудами, оказывает наибольший эффект относительно гармонических волн, взятых по отдельности из представленных диапазонов частот, а также негармонических волн, включающих меньший набор амплитудно-частотных характеристик.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что наибольшая эффективность установлена для образца с наиболее низкой абсолютной проницаемостью ($k_{абс}=242,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Наибольшую эффективность

показало воздействие с амплитудно-частотной характеристикой и профилем волны, представленными на рисунках 2.16, 2.17.

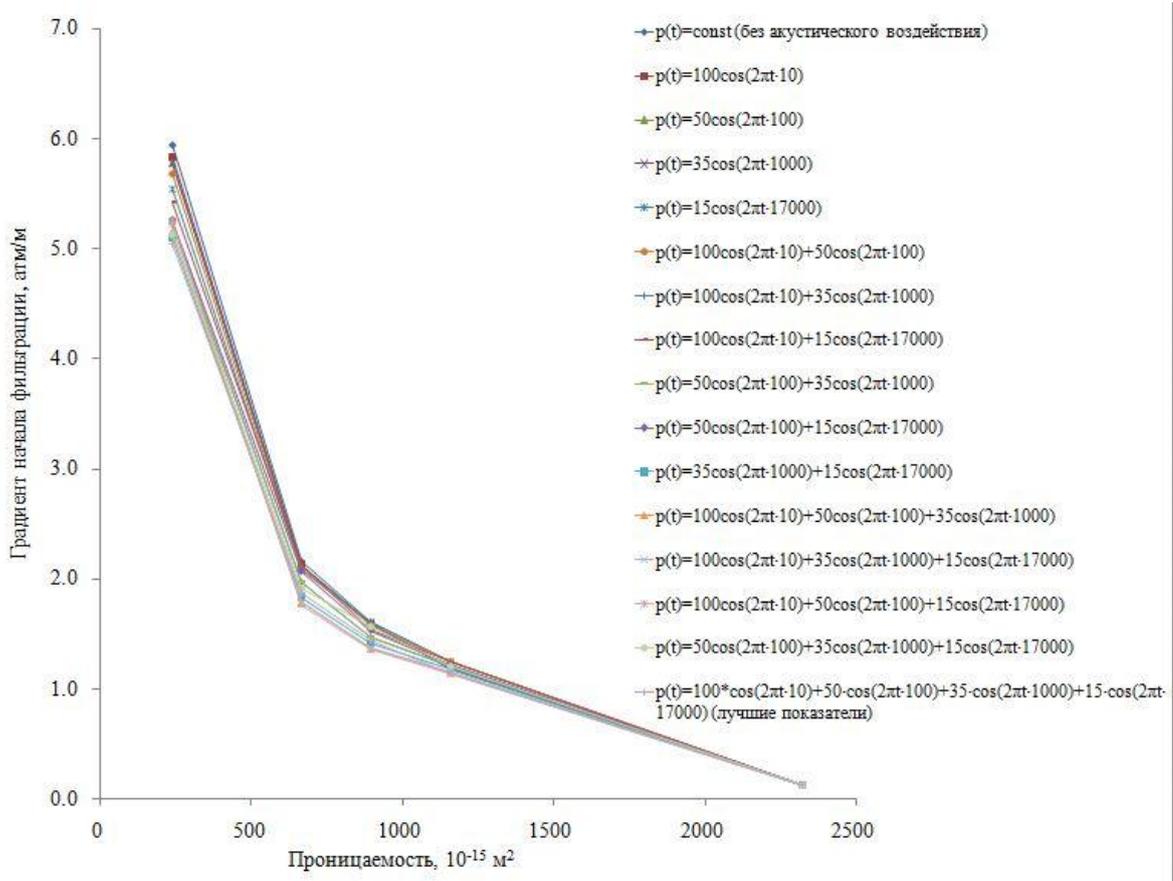


Рисунок 2.15 – Результаты влияния негармонических акустических колебаний на изменение критического градиента давления начала фильтрации

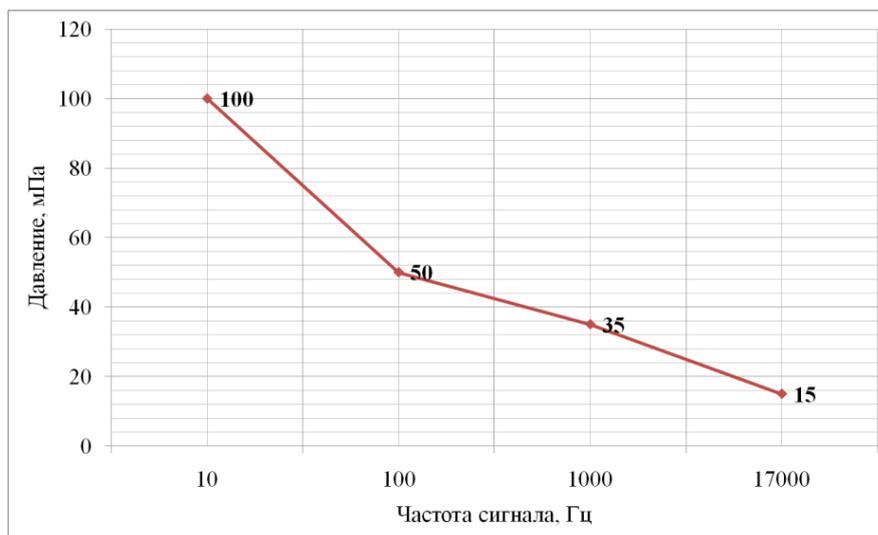


Рисунок 2.16 – Амплитудно-частотная характеристика акустической волны

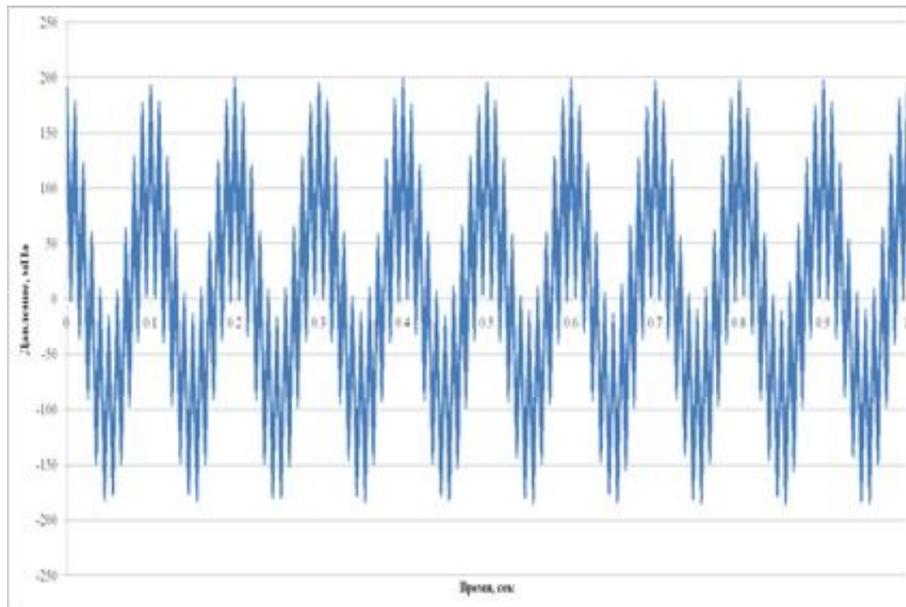


Рисунок 2.17 – Профиль негармонической акустической волны

Данная волна представлена спектром, содержащим 4 оператора, и описывается следующим уравнением:

$$p(t) = 100 \cos(2\pi t \cdot 10) + 50 \cos(2\pi t \cdot 100) + 35 \cos(2\pi t \cdot 1000) + 15 \cos(2\pi t \cdot 17000), \quad (2.1)$$

где $p(t)$ – функция амплитуды, описывающая негармоническую волну, Па;

t – время, с.

Аппроксимируя результаты экспериментов, были получены следующие тренды, представленные на рисунке 2.18.

Результаты проведения экспериментов.

В результате экспериментов установлено, что критический градиент давления начала фильтрации снижается с повышением абсолютной проницаемости керна.

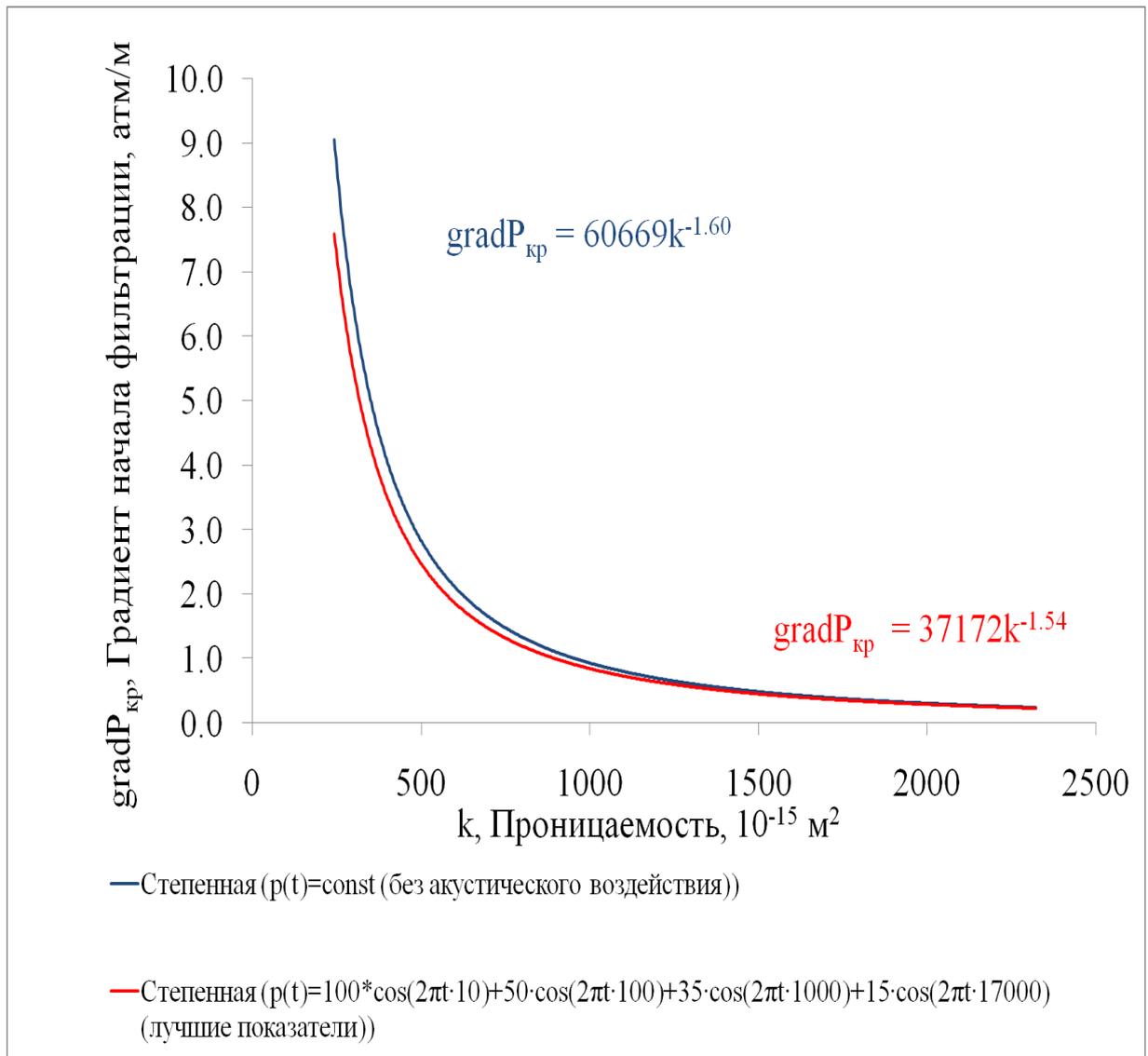


Рисунок 2.18 – Аппроксимации полученных результатов

Акустическое воздействие приводит к снижению критического градиента давления начала фильтрации. Эффект снижения критического градиента давления начала фильтрации более выражен для образца с относительно низкой абсолютной проницаемостью ($k_{\text{абс}}=242,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Градиент давления начала фильтрации снизился с 5,9 атм/м до 5,0 атм/м, что в процентном отношении составило 15 %. Максимальный эффект (снижение на 15 %) наблюдался при воздействии негармоническими акустическими колебаниями, включающими 4 синусоидальных волны из низко-, средне- и высокочастотного диапазона.

Анализируя результаты проведения эксперимента, можно также обнаружить зависимость проявления эффекта снижения градиента давления начала фильтрации от абсолютной проницаемости зерна (рисунок 2.19).

Изменение градиента давления относительно базового показателя (полученного без акустического воздействия) - $\Delta\text{gradP}_{\text{кр}}$.

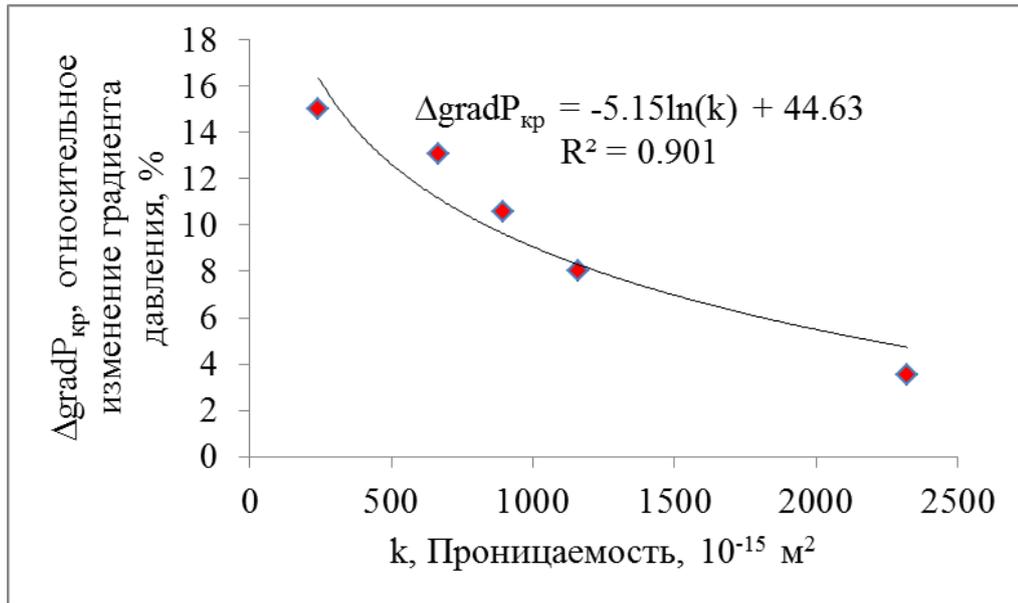


Рисунок 2.19 – Зависимость изменения критического градиента давления начала фильтрации от коэффициента абсолютной проницаемости керна

Следует отметить, что воздействие акустическими волнами, лежащими примерно в одном диапазоне частот (например, средние частоты) также показывает эффект снижения критического градиента давления начала фильтрации, однако, данный эффект ниже относительно сложного спектра частот.

2.2.4 Влияние негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности

Цель эксперимента: оценить влияние воздействия акустических негармонических колебаний на изменение коэффициента подвижности (k/μ) при фильтрации воды через образцы керна.

Объект эксперимента: образцы керна, характеристики которых были описаны в пункте 2.2.2. В данном эксперименте были исследованы не только высокопроницаемые образцы, но и керны с абсолютной проницаемостью от $1,44 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Порядок проведения эксперимента.

1. Насыщение керна до остаточной водонасыщенности равной 0,85 д.ед.
2. Фильтрация жидкости при перепаде давления 2 атм без акустического воздействия.
3. Фильтрация воды при одновременном воздействии негармоническими акустическими колебаниями.
4. Замеры объемного расхода воды.
5. Расчет значений коэффициента подвижности.

По описанному выше плану были проведены замеры объемного расхода жидкости (воды) и произведен расчет коэффициента подвижности, пользуясь законом Дарси:

$$\frac{k}{\mu} = \frac{Q}{\text{grad}P \cdot F}, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент проницаемости, м^2 ;

μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

Q – объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\text{grad}P$ – градиент давления, $\text{Па}/\text{м}$;

F – площадь сечения образца керна, м^2 .

На рисунке 2.20 представлены результаты измерения коэффициента подвижности в зависимости от их абсолютной проницаемости (ось абсцисс).

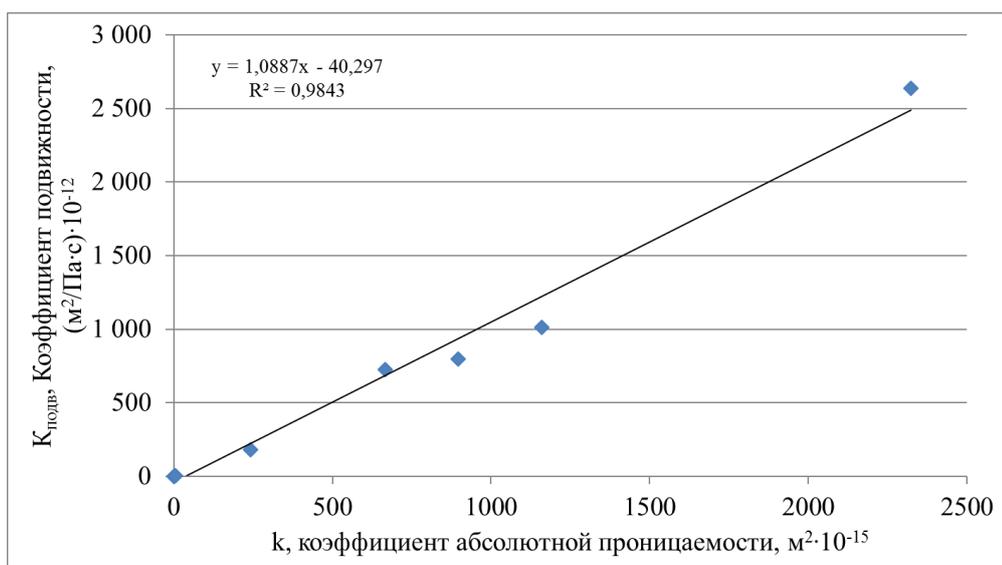


Рисунок 2.20 – Результаты лабораторного определения зависимости коэффициента подвижности от коэффициента абсолютной проницаемости

Таким образом, наблюдается практически полная корреляция между подвижностью и абсолютной проницаемостью исследуемых объектов.

После измерения объемного расхода и расчета коэффициента подвижности, были проведены эксперименты по фильтрации воды при включении установки и генерации акустического негармонического воздействия. Для этого были сгенерированы три типа волны (рисунки 2.21 - 2.26). Графики изменения давления были приведены с учетом давления жидкости на входе в образец керна.

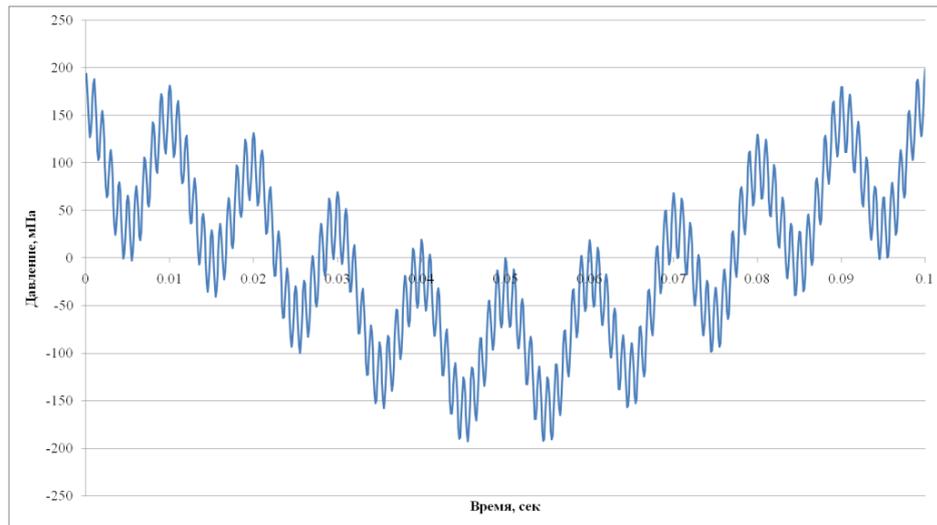


Рисунок 2.21 – 1-ый тип профиля волны

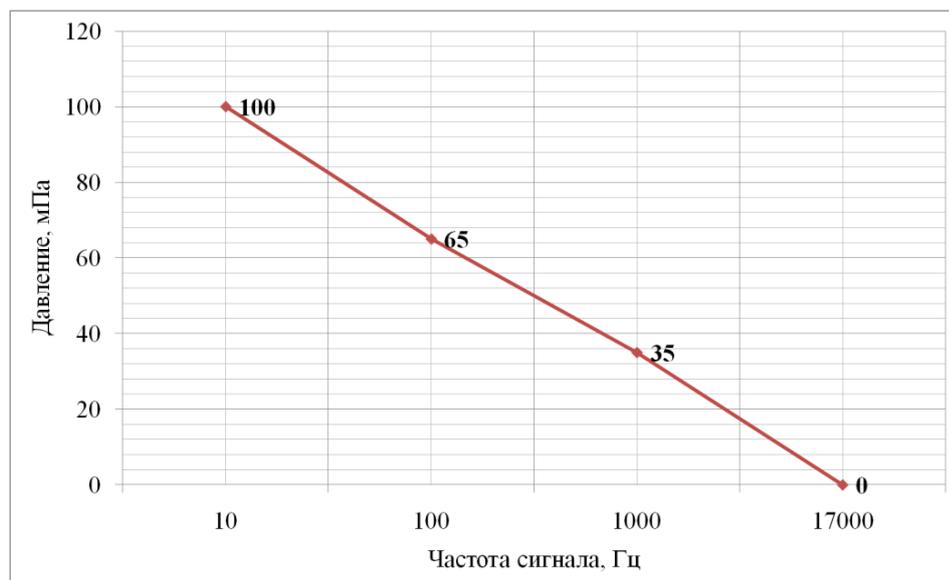


Рисунок 2.22 – Частотная характеристика операторов колебания 1-ого типа профиля волны

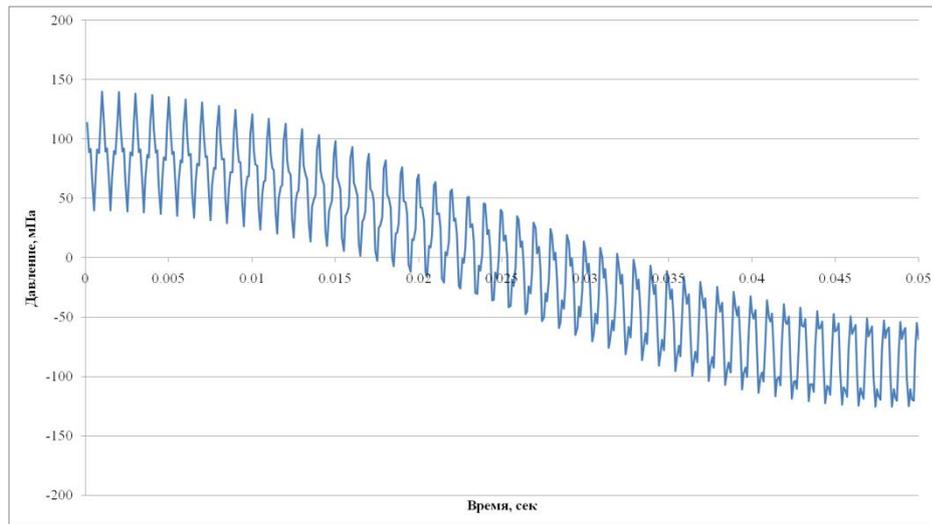


Рисунок 2.23 – 2-ой тип профиля волны

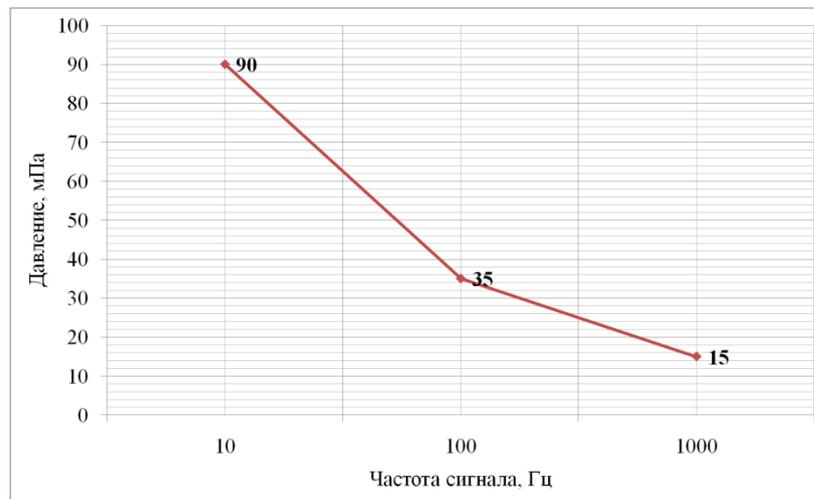


Рисунок 2.24 – Частотная характеристика операторов колебания 2-ого типа профиля волны

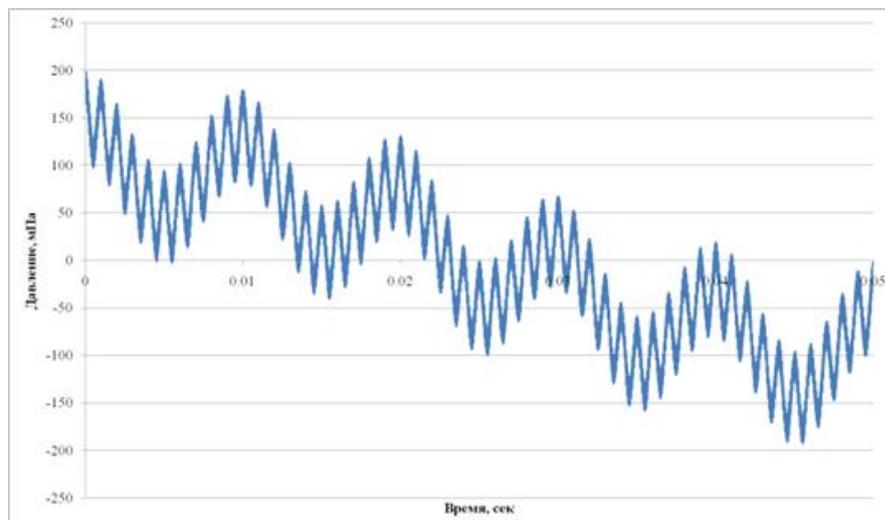


Рисунок 2.25 – 3-ий тип профиля волны

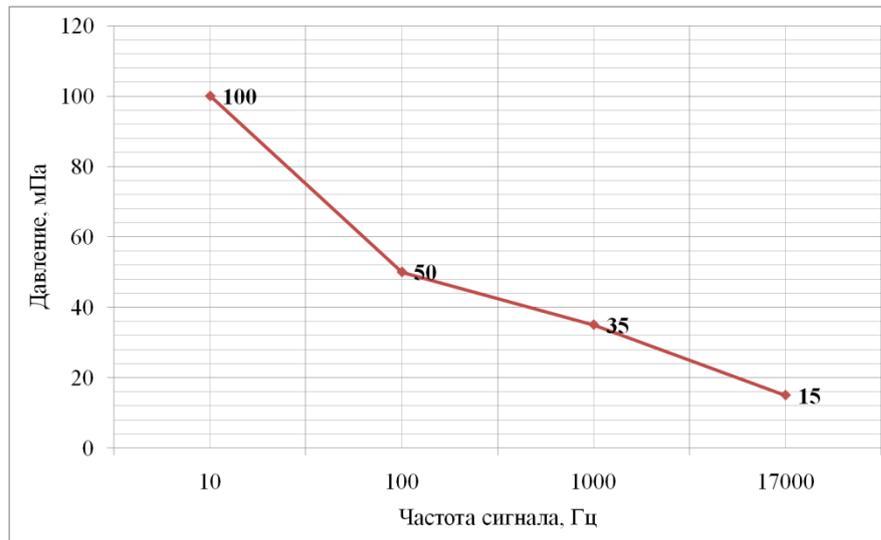


Рисунок 2.26 – Частотная характеристика операторов колебания 3-его типа профиля волны

Во всех типах волн рассматривается набор гармоник из разных спектров диапазона частот: от инфра- до ультразвука.

Для первого типа волны результат воздействия выглядит следующим образом (рисунки 2.27, 2.28). На рисунках приведены средние значения полученных результатов по итогам проведения экспериментов.

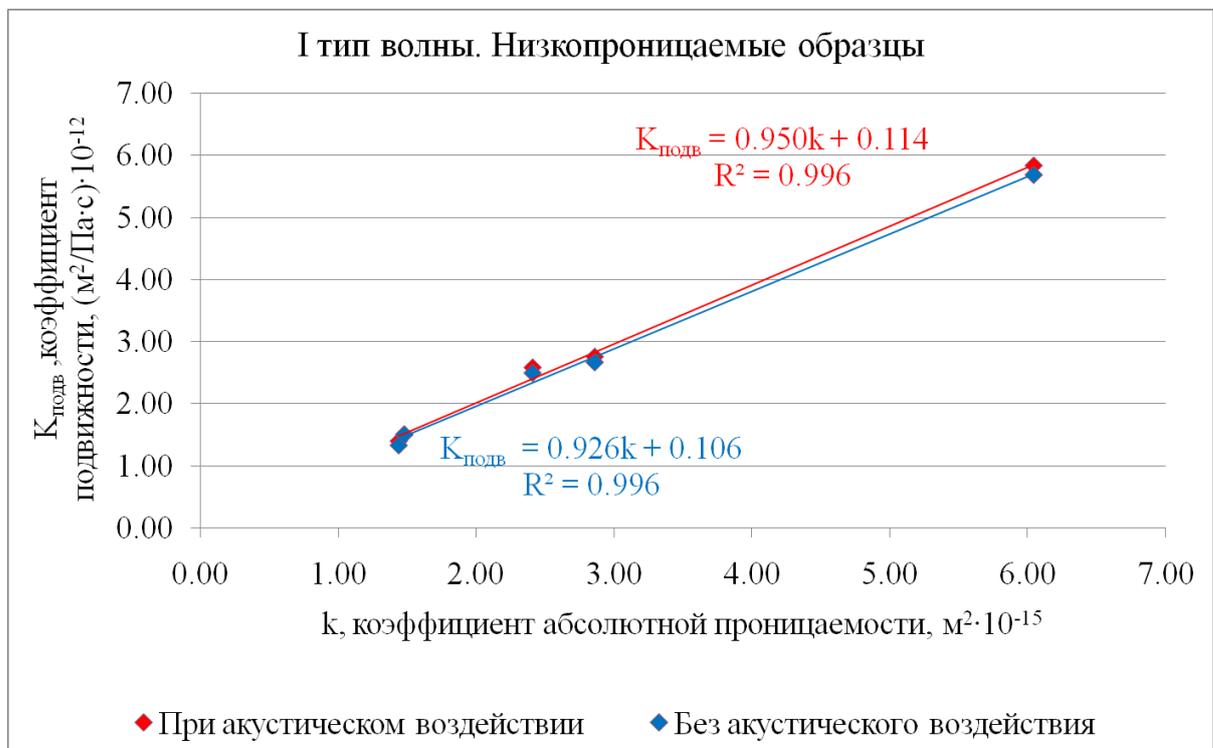


Рисунок 2.27 – Результаты влияния акустического воздействия на коэффициент подвижности

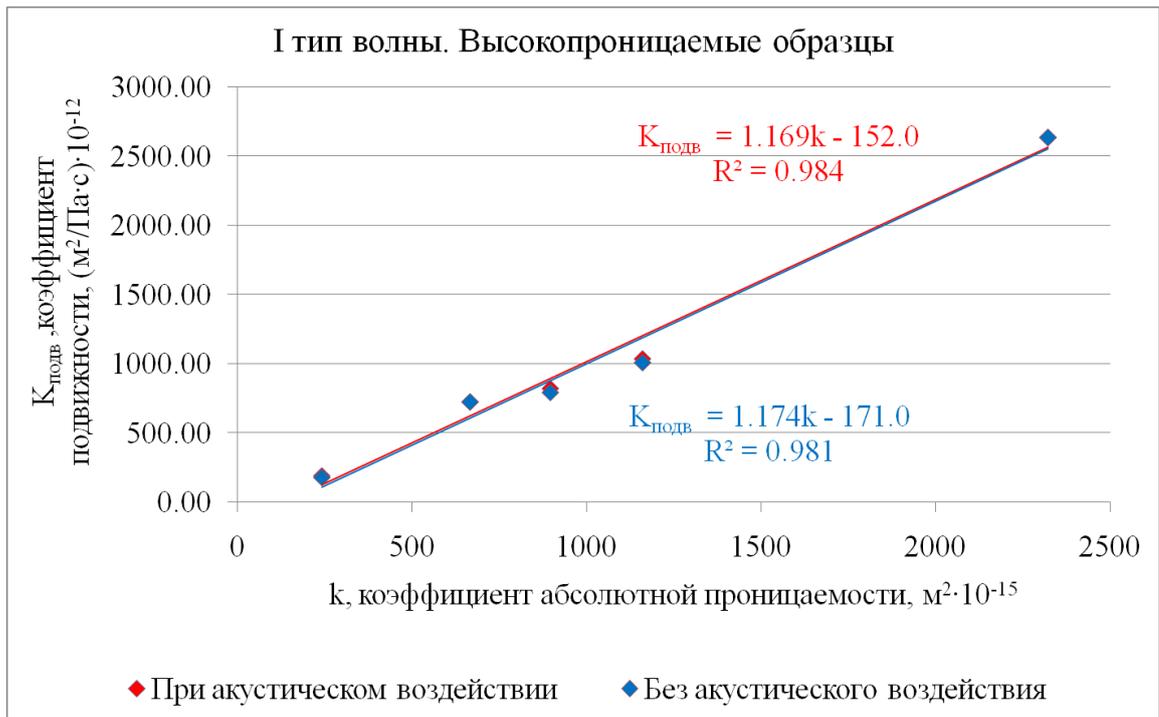


Рисунок 2.28 – Результаты влияния акустического воздействия на коэффициент подвижности

Максимальный эффект в процентном соотношении для низкопроницаемого зерна наблюдается по образцу с абсолютной проницаемостью, равной $1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Эффект выражен в 4,8 % увеличении коэффициента подвижности по минерализованной воде с $1,34 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$ до $1,40 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$. Эффект практически отсутствует для образца с проницаемостью $2,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. В среднем для группы образцов с низкой проницаемостью повышение коэффициента подвижности составило 2,82 %.

Максимальный эффект в процентном соотношении для высокопроницаемого зерна наблюдается по образцу с абсолютной проницаемостью, равной $242,2 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$. Эффект выражен в 6,63 % увеличении коэффициента подвижности по воде с $181,51$ до $193,54 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$. Наименьший эффект составил 0,02 % для образца с абсолютной проницаемостью $2322,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (повышение подвижности с $2639,92 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$ до $2640,35 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$). В среднем для группы образцов с высокой проницаемостью повышение коэффициента подвижности составило 2,63 %.

Результаты воздействия 1-ым типом профиля волны представлены в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Результаты экспериментов при воздействии колебаниями 2-ого типа профиля волны

№	Вязкость жидкости	Абсолютная проницаемость образца	$K_{\text{подв}}$ без воздействия	$K_{\text{подв}}$ при акустическом воздействии	Изменение
п/п	Па·с	$\text{м}^2 \cdot 10^{-15}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	%
1	2	3	4	5	6
1	0,001	1,4	1,34	1,40	4,84
2	0,001	1,5	1,51	1,51	0,00
3	0,001	2,4	2,50	2,59	3,45
4	0,001	2,9	2,67	2,76	3,23
5	0,001	6,0	5,69	5,84	2,58
6	0,001	242,2	181,51	193,54	6,63
7	0,001	666,7	727,35	728,21	0,12
8	0,001	896,7	795,90	825,22	3,68
9	0,001	1160,7	1011,90	1039,50	2,73
10	0,001	2322,2	2639,92	2640,35	0,02

Для 2-ого типа профиля волны максимальное повышение коэффициента подвижности для образцов керна с низкой проницаемостью составило 9,7 % (увеличение подвижности с 1,34 до 1,47 ($\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$)), а для образца с абсолютной проницаемостью $6 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$ изменение коэффициента подвижности составило 0,5 %. Среднее для группы значение повышения коэффициента подвижности для группы низкопроницаемых образцов при воздействии 2-ым профилем волны составило 4,4 % (рисунок 2.29).

Максимальный эффект в процентном соотношении для высокопроницаемого керна наблюдается по образцу с абсолютной проницаемостью, равной $242,2 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$. Эффект выражен в 0,86 % увеличении коэффициента подвижности по воде с 181,51 до 183,07 ($\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$). Эффект повышения подвижности не наблюдался для образца с проницаемостью $2322,2 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$. В среднем для группы образцов с высокой проницаемостью повышение коэффициента подвижности составило 0,41 % (рисунок 2.30).

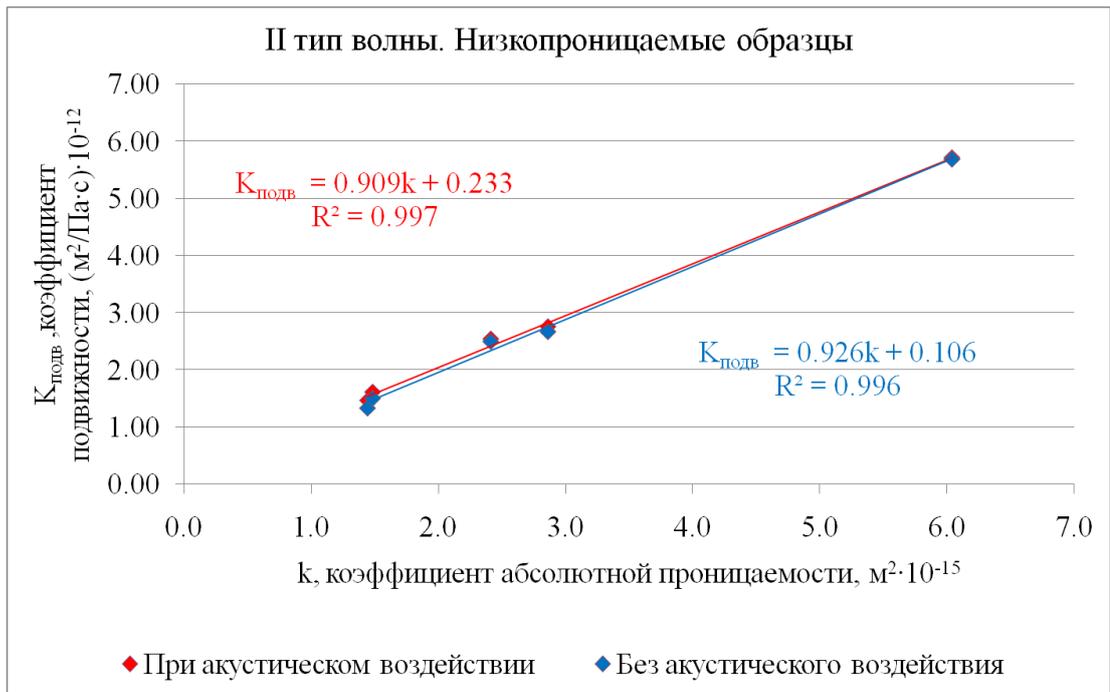


Рисунок 2.29 – Результаты влияния акустического воздействия 2-ого типа профиля волны на коэффициент подвижности (низкопроницаемый керн)

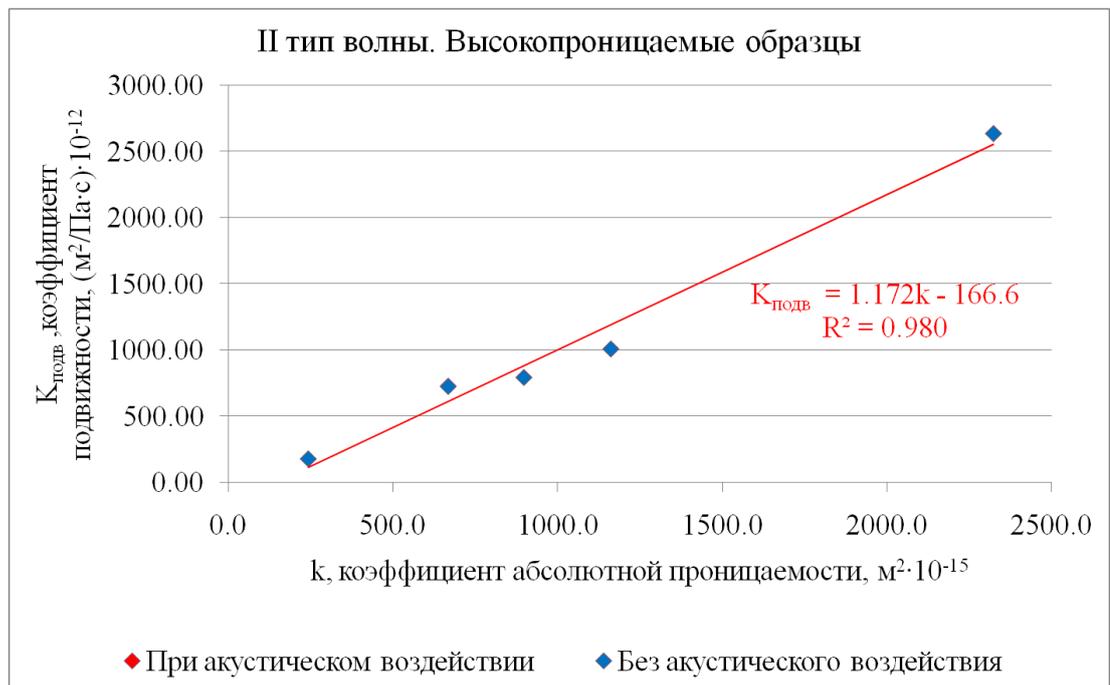


Рисунок 2.30 – Результаты влияния акустического воздействия 2-ого типа профиля волны на коэффициент подвижности (высокопроницаемый керн)

В таблице 2.4 представлены обобщенные для обеих групп образцов результаты проведения экспериментов по акустическому воздействию для второго типа профиля волны.

Таблица 2.4 – Результаты экспериментов при воздействии колебаниями 2-ого типа профиля волны

№	Вязкость жидкости	Абсолютная проницаемость образца	$K_{\text{подв}}$ без воздействия	$K_{\text{подв}}$ при акустическом воздействии	Изменение
п/п	Па·с	$\text{м}^2 \cdot 10^{-15}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	%
1	0,001	1,4	1,34	1,47	9,68
2	0,001	1,5	1,51	1,61	6,86
3	0,001	2,4	2,50	2,54	1,72
4	0,001	2,9	2,67	2,76	3,23
5	0,001	6,0	5,69	5,72	0,53
6	0,001	242,2	181,51	183,07	0,86
7	0,001	666,7	727,35	733,43	0,84
8	0,001	896,7	795,90	798,49	0,33
9	0,001	1160,7	1011,90	1012,77	0,09
10	0,001	2322,2	2639,92	2638,62	-0,05

Как видно из таблицы, повышение коэффициента подвижности в среднем выражено больше для образцов с низкой проницаемостью, что может свидетельствовать об эффективности акустического воздействия на низкопроницаемый керн.

Для 3-ого типа профиля волны максимальное повышение коэффициента подвижности для образцов керна с низкой проницаемостью составило 27,42 % (увеличение подвижности с 1,34 до 1,70 ($\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$)), а для образца с абсолютной проницаемостью $2,4 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$ изменение коэффициента подвижности составило 11,64 %. Среднее для группы значение повышения коэффициента подвижности для группы низкопроницаемых образцов при воздействии 3-ым типом волны составило 19,18 % (рисунок 2.31).

Максимальный эффект в процентном соотношении для высокопроницаемого керна наблюдается по образцу с абсолютной проницаемостью, равной $242,2 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$. Эффект выражен в 11,64 % увеличении коэффициента подвижности по минерализованной воде с 181,51 ($\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$) до 202,64 ($\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$). Наименьший эффект составил 0,16 % для образца с

проницаемостью $2322,2 \text{ м}^2 \cdot 10^{-15}$ (повышение подвижности с $2639,9 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$ до $2644,23 \text{ (м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с)}$).

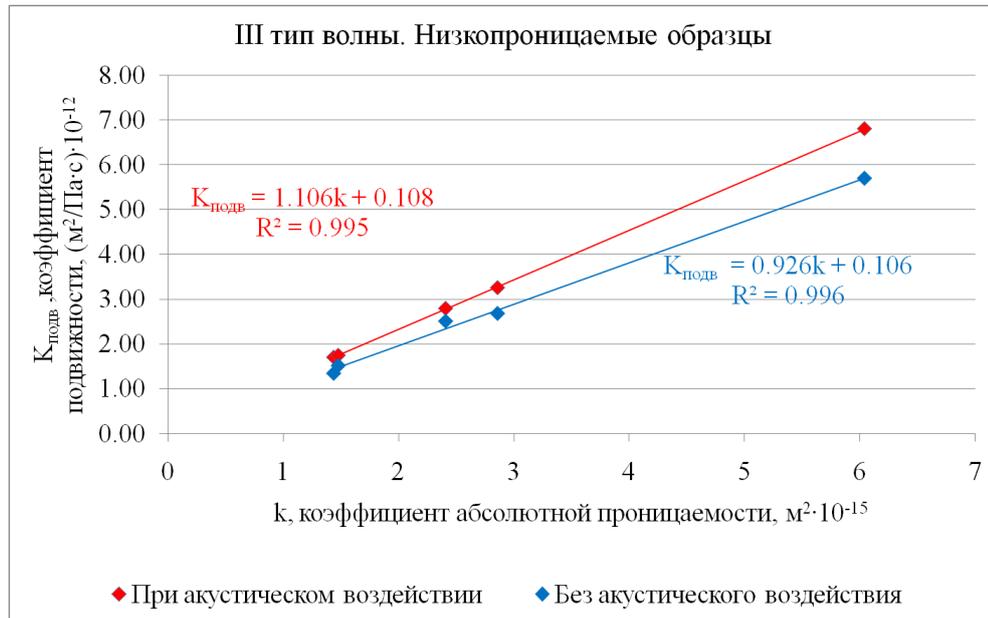


Рисунок 2.31 – Результаты влияния акустического воздействия 3-ого типа профиля волны на коэффициент подвижности (низкопроницаемый керн)

В среднем для группы образцов с высокой проницаемостью повышение коэффициента подвижности составило 6,18 % (рисунок 2.32, таблица 2.5).

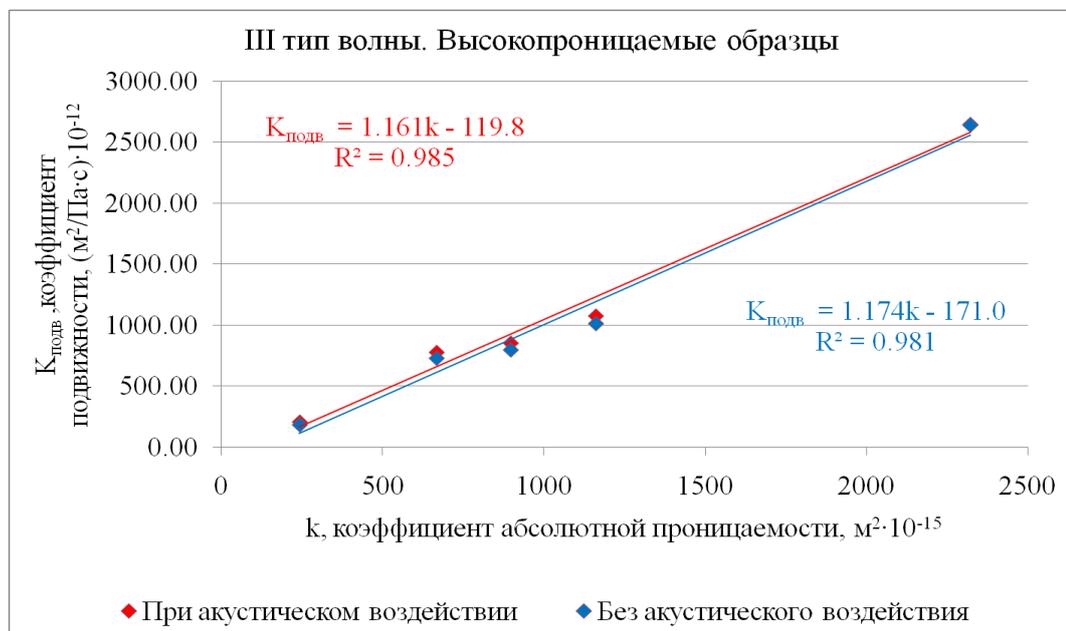


Рисунок 2.32 – Результаты влияния акустического воздействия 3-ого типа профиля волны на коэффициент подвижности (высокопроницаемый керн)

Таблица 2.5 - Результаты экспериментов при воздействии колебаниями 3-го типа профиля волны

№	Вязкость жидкости	Абсолютная проницаемость образца	$K_{\text{подв}}$ без воздействия	$K_{\text{подв}}$ при акустическом воздействии	Изменение
п/п	Па·с	$\text{м}^2 \cdot 10^{-15}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{м}^2 \cdot 10^{-12} / \text{Па} \cdot \text{с}$	%
1	0,001	1,4	1,34	1,70	27,42
2	0,001	1,5	1,51	1,75	15,71
3	0,001	2,4	2,50	2,79	11,64
4	0,001	2,9	2,67	3,25	21,71
5	0,001	6,0	5,69	6,79	19,39
6	0,001	242,2	181,51	202,64	11,64
7	0,001	666,7	727,35	774,34	6,46
8	0,001	896,7	795,90	849,36	6,72
9	0,001	1160,7	1011,90	1071,83	5,92
10	0,001	2322,2	2639,92	2644,23	0,16

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее эффективным оказалось акустическое воздействие с 3 типом волны, функция которой описана следующим уравнением (2.3):

$$p(t) = 100 \cdot \cos(t \cdot 2\pi \cdot 10) + 50 \cdot \cos(t \cdot 2\pi \cdot 100) + 35 \cdot \cos(t \cdot 2\pi \cdot 1000) + 15 \cdot \cos(t \cdot 2\pi \cdot 17000). \quad (2.3)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при воздействии каждой из 3 типов профиля волны наблюдается повышение коэффициента подвижности при фильтрации воды через образцы керна. Эффект более выражен для образцов с низкой проницаемостью, для керна с самым высоким показателем коэффициента абсолютной проницаемости, эффект от воздействия минимальный. Кроме того, эффект более выражен в среднем для группы низкопроницаемого керна (рисунок 2.33, таблица 2.6).

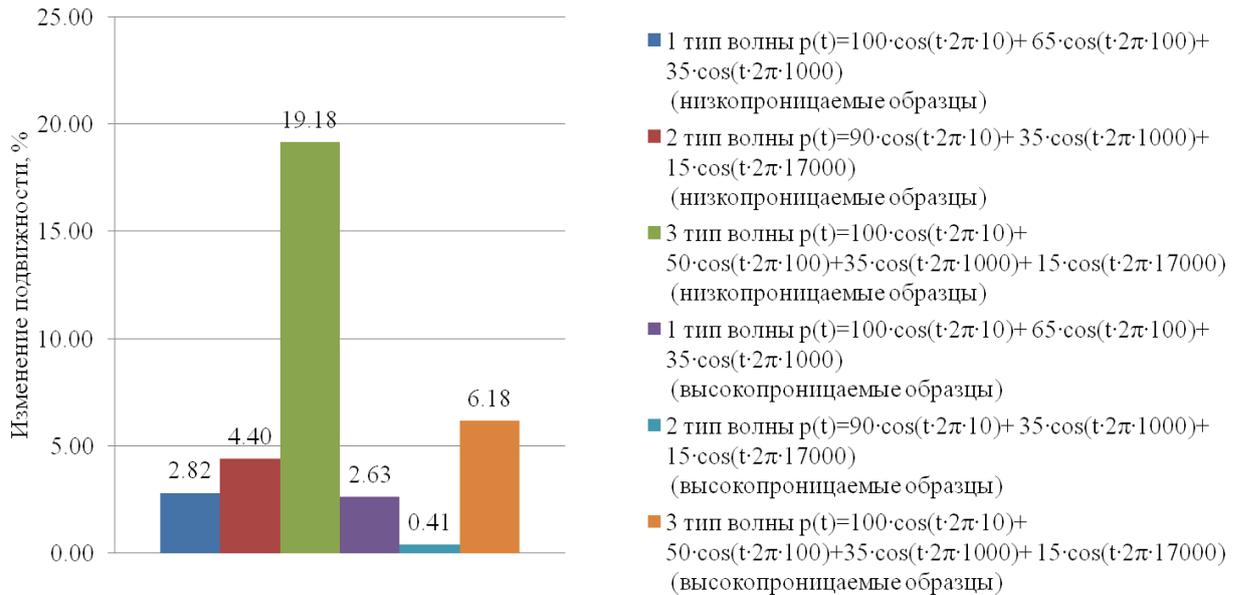


Рисунок 2.33 – Обобщенная диаграмма результатов исследования влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности

2.2.5 Влияние негармонических акустических колебаний на коэффициент вытеснения нефти водой

Цель эксперимента: оценить влияние воздействия акустических негармонических колебаний на изменение коэффициента вытеснения нефти водой.

Объект эксперимента: образцы керна, описанные в предыдущих разделах данной работы.

Порядок проведения эксперимента.

1. Насыщение образцов керна моделью нефти. В качестве насыщающего флюида использовалась модель нефти на основе керосина с плотностью 815 кг/м^3 и динамической вязкостью $1,35 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

2. Вытеснение модели нефти водой из образца при помощи лабораторной установки, описанной в предыдущих разделах. Промывка водой производилась до полного отсутствия поступления нефти из исследуемого образца.

3. Определение количества вытесненной нефти без акустического воздействия, расчет коэффициента вытеснения.

Таблица 2.6 – Обобщенные результаты проведенных экспериментов

№	Базовые показатели		1 тип волны (низкопропускаемые образцы)		2 тип волны (низкопропускаемые образцы)		3 тип волны (низкопропускаемые образцы)	
	$K_{\text{абс}}^{\text{прон}}$	$K_{\text{подв без возд.}} \cdot 10^{-12}$	$K_{\text{подв при возд.}} \cdot 10^{-12}$	Изменение %	$K_{\text{подв при возд.}} \cdot 10^{-12}$	Изменение %	$K_{\text{подв при возд.}} \cdot 10^{-12}$	Изменение %
п/п	$\text{м}^2 \cdot 10^{-15}$	$(\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^{-12}$	$(\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^{-12}$	%	$(\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^{-12}$	%	$(\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^{-12}$	%
1	1,44	1,34	1,40	4,84	1,47	9,68	1,70	27,42
2	1,48	1,51	1,51	0,00	1,61	6,86	1,75	15,71
3	2,41	2,50	2,59	3,45	2,54	1,72	2,79	11,64
4	2,86	2,67	2,76	3,23	2,76	3,23	3,25	21,71
5	6,04	5,69	5,84	2,58	5,72	0,53	6,79	19,39
Среднее для группы I	2,74	2,82	2,82	2,82	2,82	4,40	3,26	19,18
6	242,15	181,51	193,54	6,63	183,07	0,86	202,64	11,64
7	666,73	727,35	728,21	0,12	733,43	0,84	774,34	6,46
8	896,65	795,90	825,22	3,68	798,49	0,33	849,36	6,72
9	1160,74	1011,90	1039,50	2,73	1012,77	0,09	1071,83	5,92
10	2322,22	2639,92	2640,35	0,02	2638,62	-0,05	2644,23	0,16
Среднее для группы II	1071,32	1085,36	1073,27	2,63	1073,27	0,41	1108,48	6,18

4. Вытеснение нефти водой при включенном генераторе акустических колебаний.

5. Оценка наличия дополнительно вытесненной из образца нефти при акустическом воздействии.

Коэффициент вытеснения рассчитывался по формуле:

$$k_{\text{ВЫТ}} = \frac{S_{\text{НН}} - S_{\text{ОН}}}{S_{\text{НН}}}, \quad (2.3)$$

где $S_{\text{НН}}$ – коэффициент начальной нефтенасыщенности, д.ед.,

$S_{\text{ОН}}$ – коэффициент остаточной нефтенасыщенности, д.ед..

В ходе первого этапа эксперимента определялся коэффициент извлечения нефти путем прокачки воды через насыщенные моделью нефти образцы керна. После прекращения извлечения из образца модельной нефти замерялось ее количество (рисунок 2.34) и определялся коэффициент остаточной нефтенасыщенности, при помощи которого рассчитывался коэффициент вытеснения $K_{\text{ВЫТ}}^1$.



Рисунок 2.34 – Измерение объема вытесненной жидкости

Далее производилось включение акустического генератора, инициирующего акустические волны с профилем 3-его типа (рисунок 2.25) из предыдущей группы экспериментов. Осуществлялась прокачка воды через образец керна при одновременном акустическом воздействии. Производилось наблюдение за появлением дополнительного количества вытесненной нефти. Результат фиксировался, замерялся, производился расчет остаточной нефтенасыщенности и значение $K_{\text{выт}}^2$. Результаты экспериментов представлены на диаграмме (рисунок 2.35).

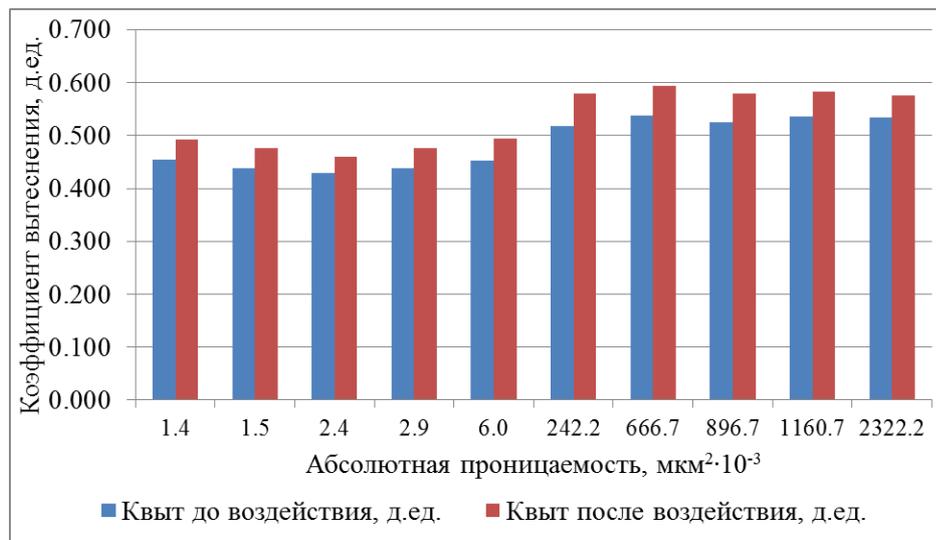


Рисунок 2.35 – Результаты изменения коэффициента вытеснения при воздействии негармоническими акустическими колебаниями

Таким образом, можно заключить, что присутствует положительный эффект от воздействия на процесс вытеснения модельной нефти водой, выраженный в повышении коэффициента вытеснения в среднем на 8,3 % по низкопроницаемому керну и на 9,9 % по высокопроницаемому керну. В среднем по всем исследованным образцам на 9 %.

Данный эффект может быть объяснен изменением капиллярных сил в поле упругих колебаний, а также разрушением облитерационных слоев, вымещением конгломератов из тупиковых пор из-за средне- и низкочастотных составляющих волны, что подтверждается опытами других ученых, описанными ранее.

Основные выводы по разделу 2

1. Большое количество данных о лабораторных исследованиях по воздействию акустическими колебаниями на фильтрацию жидкости сквозь поровую среду говорит о влиянии данного воздействия на фильтрационные характеристики среды и реологические параметры флюидов.

2. Разные параметры акустической волны (частота и амплитуда, а также производные этих параметров) по-разному влияют на фильтрационные и реологические характеристики.

3. Рассматривая насыщенную поровую среду, можно заключить, что каждая фаза в отдельности имеет свои резонансные колебательные частоты, достижение которых способствует синергетическому эффекту, выраженному в повышении скорости фильтрации жидкости.

4. Разработанная и собранная лабораторная установка позволяет проводить исследования влияния акустических негармонических колебаний на процессы фильтрации жидкости сквозь поровую среду, а именно образцы естественного керна.

5. Исследования акустического воздействия показали снижение критического градиента давления начала фильтрации до 15 %. Наибольшая относительная эффективность воздействия установлена для образца с меньшим значением абсолютной проницаемости.

6. Исследования акустического воздействия показали повышение коэффициента подвижности при фильтрации воды в среднем на 6,2 % для образцов с высокой абсолютной проницаемостью и на 19,2 % для образцов с низкой проницаемостью.

7. Наблюдался положительный эффект от воздействия на процесс вытеснения модельной нефти водой, выраженный в повышении коэффициента вытеснения в среднем на 8,3 % по низкопроницаемому керну и на 9,9 % по высокопроницаемому керну. В среднем по всем исследованным образцам на 9 %.

8. Наибольшая эффективность наблюдалась при воздействии негармоническими акустическими колебаниями, включающими 4 гармонических волны из разных диапазонов частот: низкого, среднего и высокого.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕГАРМОНИЧЕСКИМИ АКУСТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

В разделе 1 данной работы были рассмотрены многие технологии акустического воздействия как на призабойную зону, так и на продуктивный пласт целиком, включая межскважинное пространство. В ходе исследований результатов промысловых испытаний было установлено, что высокочастотное акустическое воздействие приводит к очистке призабойной зоны скважин, снижению вязкости нефти, что в совокупности способствует интенсификации добычи. Воздействие с частотами, лежащими в среднем диапазоне слышимого звука, приводят к снижению влияния капиллярных сил, снижению градиента давления начала фильтрации. Низкочастотное воздействие приводит к повышению коэффициента вытеснения, за счет доотмыва пленочной нефти.

Синергетический эффект от воздействия негармоническими акустическими колебаниями, включающими низко-, средне- и высокочастотный диапазоны, был исследован путем лабораторных исследований, описанных в разделе 2 и в работах [71 – 73]. Установлено, что в поле негармонических акустических колебаний снижается критический градиент давления начала фильтрации, повышается коэффициент подвижности при фильтрации жидкости через образцы керна. Указанные эффекты могут быть заложены в разработку технологии акустического воздействия с целью интенсификации добычи нефти из малодебитных скважин [74].

3.1 Метод воздействия на продуктивный пласт негармоническими акустическими колебаниями при одновременной добычи нефти

Как было указано ранее (см. раздел 1) на сегодняшний день представлено множество технических устройств для акустического воздействия на пласт – как из скважины, так и с поверхности. Все они могут быть классифицированы

относительно способа генерации упругих колебаний, частоты рабочего диапазона и мощности воздействия.

Анализ достоинств и недостатков каждого типа устройств показал, что с точки зрения простоты конструкции излучателя наибольший интерес представляют устройства, работающие за счет энергии потока жидкости. Однако они могут быть использованы только в нагнетательных скважинах или в ходе проведения ГТМ (например, кислотных обработок или закачки поверхностно-активных веществ) в добывающих скважинах. Кроме того, такие устройства, относящиеся к гидродинамическому классу, не позволяют избирательно подбирать частоты в ходе воздействия, и, тем более, не позволяют сгенерировать сложную негармоническую акустическую волну.

Таким образом, для разработки методики акустического негармонического воздействия необходимо использование пьезокерамических (или пьезокомпозитных) внутрискважинных излучателей в совокупности с генератором негармонических акустических волн. Излучатели такого типа могут генерировать акустическую волну в широком диапазоне частот, кроме того, довольно простым способом возможно регулировать амплитуду и набор частот прямо с поверхности.

К недостаткам существующих методов акустического воздействия на пласт можно отнести временные эффекты от воздействия, выраженные в повышении дебита скважины, который через некоторое время возвращается на прежний уровень. Это вызывает необходимость остановки скважины и проведения повторных операций. С экономической точки зрения это не рентабельно в производственных условиях. Таким образом, задача разработки метода воздействия на пласт сводится к нахождению такого технического решения, которое бы позволяло:

- поддерживать высокий дебит скважины,
- избегать остановок скважины,
- в процессе эксплуатации скважины регулировать характеристики воздействия для достижения высоких дебитов скважин по нефти.

На основании проведенных лабораторных экспериментов предлагается методика воздействия акустическими негармоническими колебаниями на продуктивный пласт при одновременной добычи нефти, отличающаяся от известных тем, что, во-первых, призабойная зона пласта подвергается колебаниям, включающим сразу несколько частот (например, 4), а, во-вторых, излучатель колебаний подвешивается на колонне насосно-компрессорных труб напротив центра перфорированного интервала, позволяя осуществлять одновременную обработку пласта акустическими волнами и работу ШГН.

К отличительным особенностям предлагаемого метода также относится использование греющегося кабеля для питания внутрискважинного излучателя, что предотвращает отложений гидратов в скважине.

Кроме того, конструкция компоновки позволяет использовать в качестве привода насоса не только станок-качалку, но и гидропривод, что позволяет сократить металлоемкость конструкции и снизить капитальные затраты на оборудование скважины.

Указанные эффекты послужили основанием для предложения полезной модели устройства «Устройство комплексного акустического воздействия на призабойную зону нефтяного пласта» (рисунок 3.1) (регистрационный номер заявки 2021112699 от 30.04.2021 г.).

Предложенной полезной моделью решается задача повышения эффективности добычи нефти при акустическом воздействии за счет возможности настройки амплитудно-частотных характеристик внутрискважинного излучателя в процессе добычи нефти, использования для питания греющегося кабеля, что препятствует гидратообразованию в скважине, и возможности применения гидропривода, что снижает капитальные затраты на оборудование скважины.

Устройство обеспечивает повышение эффективности добычи нефти при акустическом воздействии за счет использования негармонической волны, вызывающей сразу несколько физических эффектов (снижение вязкости нефти, снижение критического градиента давления начала фильтрации, снижение капиллярных сил, извлечение нефти из тупиковых пор), способствующих

повышению скорости фильтрации, очищению призабойной зоны пласта и снижению обводненности скважины.

Для этого внутри скважины напротив перфорационных отверстий размещается скважинный пьезокерамический излучатель (рисунок 3.1), который питается электрической энергией подаваемой по греющему кабелю (7) от генератора сигнала акустической волны (2), размещенного на поверхности вблизи скважины. Генератор представляет собой электронный блок, включающий регуляторы частоты с возможностью выбора четырех различных частот (от 0,1 до 30 000 Гц), многоканальный фазоимпульсный модулятор и усилители мощности сигнала. Схема, представленная на рисунке 3.1, позволяет реализовать одновременную добычу нефти и воздействие на продуктивный пласт негармоническими акустическими колебаниями, включающими несколько частот. В ходе акустического воздействия на пласт происходит снижение вязкости добываемого флюида, повышение коэффициента подвижности, снижение критического градиента давления начала фильтрации. Низкочастотное воздействие может воздействовать на удаленные зоны пласта, приводя к извлечению капиллярно-удерживаемой нефти. В совокупности воздействие широким спектром акустических частот приводит к синергетическому эффекту, выраженному в интенсификации притока нефти к скважинам.

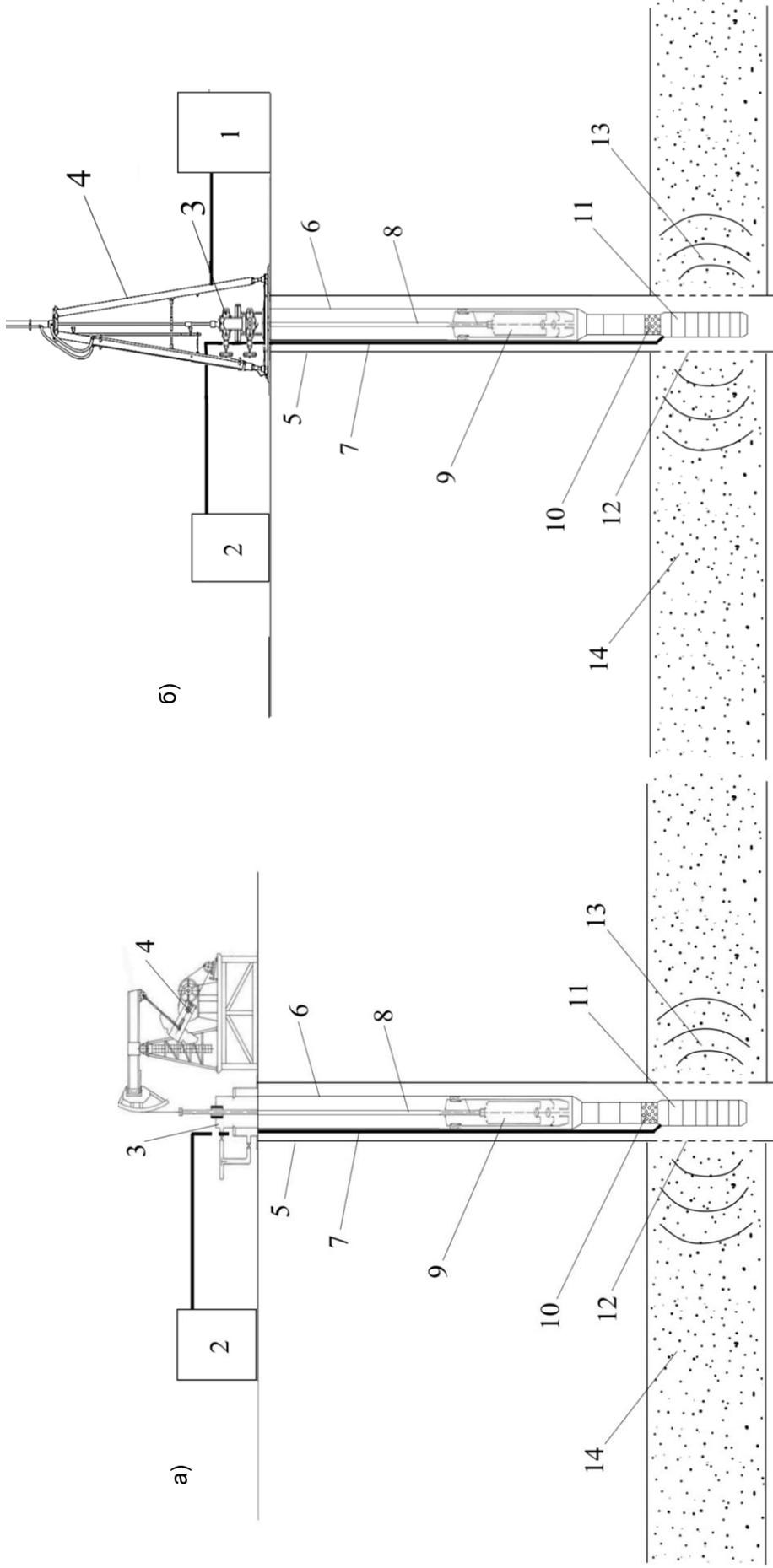
Технология осуществляется в следующей последовательности:

1. В скважину спускается компоновка, включающая НКГ (6) с установленным фильтром-хвостовиком (10), к которым подвешен пьезокерамический излучатель (11). Электричество от генератора акустического сигнала (2) подается на излучатель по греющему кабелю (7).

2. В скважину спускается насос (9), подвешенный на штангах (8), приводимый в работу станком качалкой (4) (рисунок 3.1-а) или гидроприводом (рисунок 3.1-б).

3. Далее производится настройка сигнала и запуск акустического излучателя.

4. После этого в работу запускают ШГН.



1 – блок управления гидроприводом, 2 – генератор акустического сигнала, 3 – обвязка устья скважины, 4 – а. станок-качалка; б. гидропривод;
 5 – эксплуатационная колонна, 6 – НКТ, 7 – греющий электрический кабель, 8 – штанги, 9 – насос, 10 – фильтр-хвостовик, 11 –
 внутрискважинный излучатель, 12 – зона перфорации, 13 – распространение акустических волн, 14 – продуктивный пласт.

Рисунок 3.1 – Схема компоновки насосного оборудования добывающей скважины с возможностью акустического воздействия на ПЗП

5. В течение нескольких дней можно отслеживать приток нефти и корректировать частоты при помощи генератора (2) для достижения максимального эффекта от воздействия.

К использованию в качестве источника акустических колебаний может быть предложен пьезокомпозитный излучатель, который может состоять из нескольких независимых элементов, количество которых может составлять от единиц до нескольких сотен. При работе в большом интервале глубин (до нескольких сотен метров) пьезокерамические излучатели не требуют компенсации гидростатического давления. Каждому элементу излучателя может соответствовать собственная независимая частота и амплитуда. Задавать и управлять такими излучателями возможно при помощи специальных многоканальных электронных источников, оснащенных несколькими независимыми выходами.

Размеры возможного излучателя определяются в первую очередь внутренним диаметром эксплуатационной колонны, а также высотой продуктивного интервала пласта. Для использования в эксплуатационной колонне с внешним диаметром 168 мм возможно спустить в скважину излучатель с внешним диаметром 100 мм. Необходимо отметить, что диаметр излучателя определяет мощность генерируемого акустического поля.

Технические характеристики возможного пьезоэлектрического излучателя представлены в таблице 3.1. Характеристики генератора акустического сигнала, расположенного на поверхности, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Технические характеристики внутрискважинного генератора акустических колебаний

Характеристика	Значение
Потребляемая мощность, кВт	3
Рабочая частота, Гц	0,1 – 30 000
Напряжение питания, В	150
Диаметр, мм	100
Допустимая температура внешней среды, °С	до + 90

Таблица 3.2 – Технические характеристики генератора акустических колебаний

Характеристика	Значение
Максимальная выходная мощность, кВт	6
Рабочая частота, Гц	0,1 – 30 000
Напряжение на выходе, В	до 720
Потребляемая мощность, кВт	до 7
Допустимая температура внешней среды, °С	-40 – +60

Таким образом, указанную компоновку можно использовать для негармонического акустического воздействия на нефтяной пласт при одновременной добыче нефти штанговыми глубинными насосами, приводимыми в работу посредством станков-качалок или гидропривода.

Кроме того, технология может быть использована при освоении скважин струйным насосом за счет одновременного акустического воздействия и создания циклических изменений депрессии и репрессии на пласт (рисунок 3.2, Приложение Б.1).

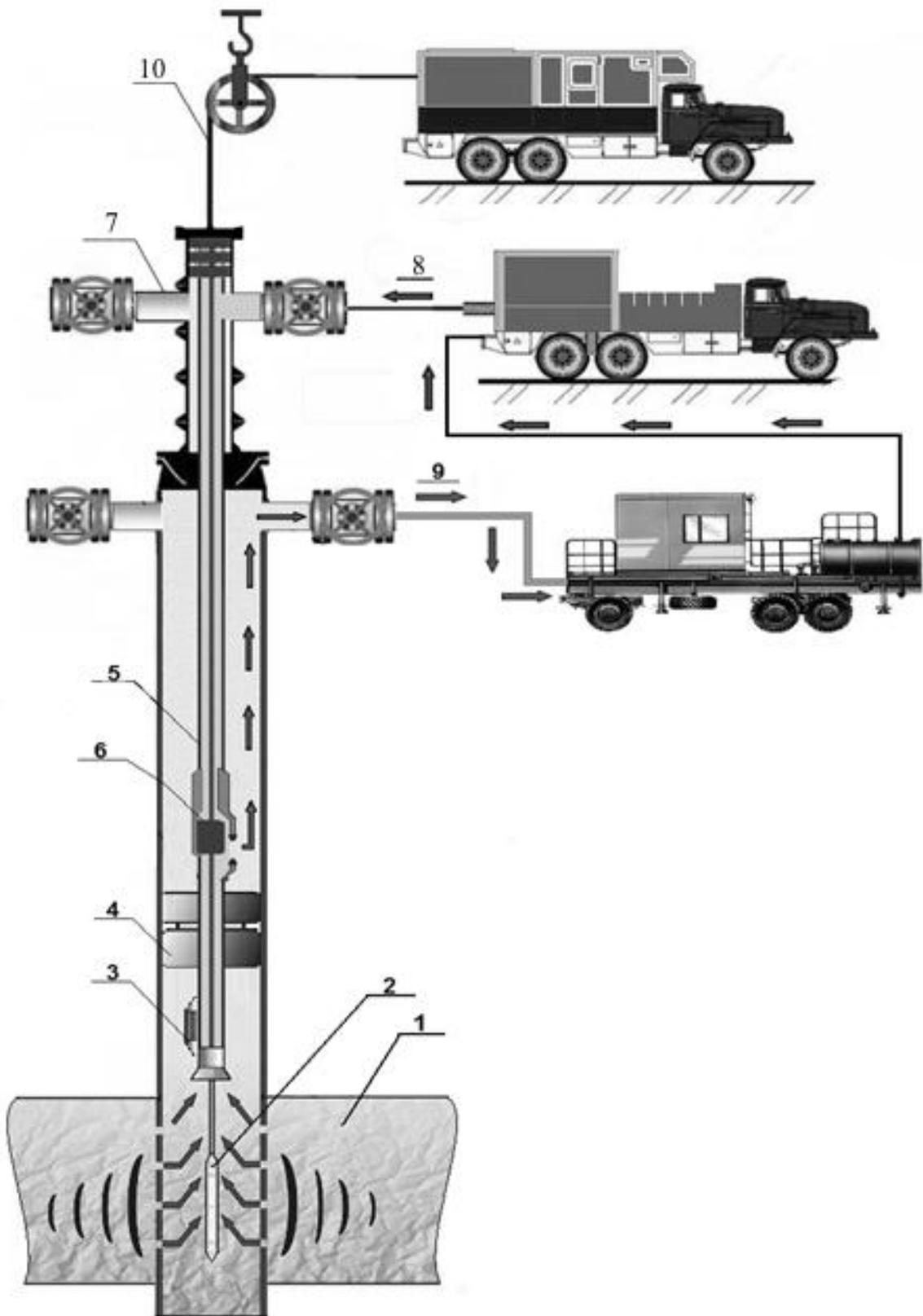
Технология освоения скважины осуществляется в следующей последовательности:

1. В скважину на питающем кабеле (10) через НКТ (5) спускается излучатель негармонических акустических колебаний (2) в интервал продуктивного пласта (1).

2. Происходит подача рабочей жидкости (8) в насосно-компрессорные трубы для работы струйного насоса (6). Давление под пакером (4) снижается и начинается приток из пласта.

3. Одновременно производится воздействие негармоническими акустическими колебаниями от генератора (2).

4. Монометр (3) регистрирует забойное давление.



1 – продуктивный пласт, 2 – акустический излучатель, 3 – датчик давления, 4 - пакер; 5 - НКТ, 6 – струйный насос, 7 – обвязка устья скважины, 8 – подача рабочей жидкости, 9 – выход скважинной продукции вместе с рабочей жидкостью, 10 – питающий кабель.

Рисунок 3.2 – Схема освоения скважины струйным насосом при акустической обработке

3.2 Выбор скважины-кандидата для проведения акустической обработки

Результаты описанных во 2 разделе исследований свидетельствуют о более высокой эффективности негармонического акустического воздействия на низкопроницаемые керны. Кроме того, нельзя утверждать об избирательном эффекте от воздействия, то есть акустические колебания способствуют интенсификации течения жидкости, как воды, так и нефти, в пористой среде. Таким образом, эффективным, с точки зрения автора, воздействие будет на малодобитных нефтяных скважинах, эксплуатирующих низкопроницаемые (до 0,1 мкм²) пласты, представленные поровыми коллекторами.

К таким объектам можно отнести пласт АС нефтяного месторождения Н, расположенного в Западной Сибири.

3.2.1 Краткая геолого-физическая характеристика эксплуатационного объекта

В физико-географическом отношении месторождение располагается в Сургутском районе Западной Сибири.

К основным характеристикам пласта относятся малое количество низко- и среднепроницаемых интервалов коллектора, расположенных среди глин в восточной области объекта, а также высокая концентрация пропластков со средней проницаемостью в западной и северной части месторождения. Данные приводятся на основании отбора керна при бурении 17 скважин, 651 исследования открытой пористости и 279 определений проницаемости.

Рассматриваемый в работе объект АС был сформирован при интенсивном падении уровня моря после пимской трансгрессии. Локальные колебания морского уровня и периодичность накопления обломочного материала привели к возникновению в пласте мелких циклов.

Отложения пласта сформированы неравномерно в виде обособленных песчано-алевролитовых тел, простирающихся узкой полосой субмеридианально – это в целом характеризует пласты группы АС как неоднородные по строению.

В толще пласта АС наблюдается тонкослоистое переслаивание песчаников, аргиллитов и алевролитов. По восточному и западному направлению отмечается замещение песчано-глинистых пород глинистыми осадками.

Неравномерное накопление терригенного материала в этом горизонте привело к формированию тонкослоистых структур, которые затрудняют выделение коллекторов в ходе проведения геофизических исследований [75]. Пласты группы АС представляют собой сложный комплекс отложений, состоящий из 4 литолого-петрофизических типов. Прослои характеризуются изменением толщин от нескольких сантиметров до 4 метров.

Нефть пластов группы изучалась на основании 22 глубинных проб по 8 скважинам, а также по 36 устьевым пробам, взятым из 22 скважин. По результатам исследований нефти классифицированы как сравнительно легкие, обладающие средней и малой вязкостью; являются сернистыми, малосмолистыми и парафинистыми (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Геолого-физические характеристики объекта разработки

Параметры	Пласт
	АС
<i>I</i>	2
Средняя глубина залегания кровли (абс.отм.), м	2318
Тип коллектора	поровый
Площадь нефтегазоносности, тыс.м ²	162290
Средняя общая толщина, м	54
Средняя эффективная нефтенасыщенная толщина, м	4.3
Средняя эффективная водонасыщенная толщина, м	4.6
Коэффициент пористости, доли ед.	0.18
Средний коэффициент нефтенасыщенности ЧНЗ, доли ед.	0.50
Средний коэффициент нефтенасыщенности ВНЗ, доли ед.	0.50
Средний коэффициент нефтенасыщенности пласта, доли ед.	0.50
Проницаемость, 10 ⁻³ мкм ²	4.0
Коэффициент песчаности, доли ед.	0.07
Расчлененность, ед.	7.6
Начальная пластовая температура, °С	80
Начальное пластовое давление, МПа	23.0
Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа.с	2.35

Продолжение таблицы 3.3

<i>1</i>	<i>2</i>
Плотность нефти в пластовых условиях, т/м ³	0.784
Плотность нефти в поверхностных условиях, т/м ³	0.854
Абсолютная отметка ВНК, м	-
Объемный коэффициент нефти, доли ед.	1.163
Содержание серы в нефти, %	0.700
Содержание парафина в нефти, %	5.13
Давление насыщения нефти газом, МПа	9.3
Газовый фактор, м ³ /т	61
Содержание сероводорода, %	-
Вязкость воды в пластовых условиях, мПа.с	0.390
Плотность воды в пластовых условиях, т/м ³	0.991
Плотность воды в поверхностных условиях, т/м ³	1.011
Сжимаемость, 1/МПа.10 ⁻⁴	
нефти	12.0
воды	4.6
породы	3
Коэффициент вытеснения, доли ед.	0.502
Коэффициент продуктивности, м ³ /сут/Мпа	0.84

На основании приведенных данных были сформулированы основные особенности пластов горизонта АС рассматриваемого месторождения:

- Шельфовые условия формирования пластов группы АС.
- Невысокие коллекторские характеристики пластов. Объясняется большим количеством глин. Высокая геологическая неоднородность объекта.
- Присутствие двух литотипов коллекторов, которые отличаются фильтрационно-емкостными свойствами и литологическими параметрами. В литотипе 1 преобладают породы-коллектора IV класса (по классификации А.А. Ханина), в литотипе 2 – породы-коллектора IV класса.
- Начальное средневзвешенное пластовое давление пласта АС составляет 23 МПа.

3.2.2 Сведения о разработке объекта

В пробуренном фонде числится 287 скважин, из которых: 201 добывающая, 82 нагнетательных (2 из которых в отработке на нефть), 4 наблюдательных.

На дату анализа степень реализации проектного фонда скважин составляет 54 %. 163 скважины или 81 % находятся в действующем фонде, в освоении находятся 9 скважин, в бездействии 1 скважина, пьезометрических – 4. Ликвидированы и находятся в ожидании ликвидации 24 скважины.

В нагнетательном фонде: 73 скважины находятся под закачкой, 2 – в отработке на нефть, 4 скважины – в освоении после бурения, 1 пьезометрическая скважина и еще 2 – бездействуют.

Особенности геологического строения обусловили разделение объекта на 5 участков, описание которых приводится ниже.

Особенностью 1 участка является наличие низкопроницаемых интервалов слабо концентрированных в толщине глин.

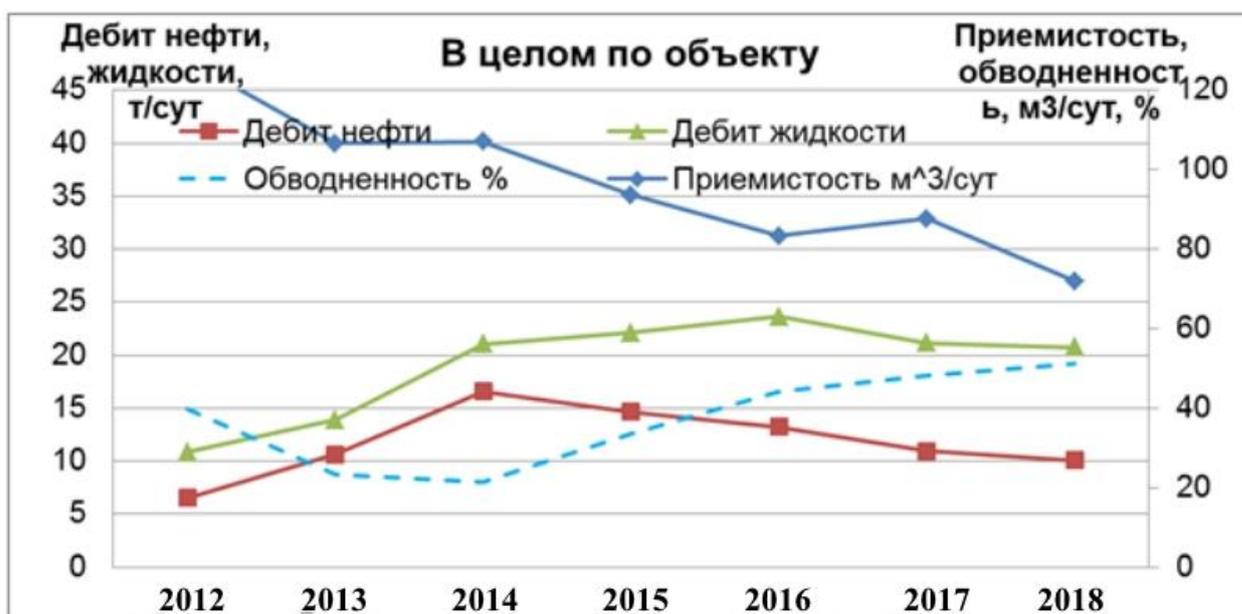


Рисунок 3.3 – Динамика технологических показателей разработки

Данный участок вводился в разработку первым. На дату анализа на участке числится 31 пробуренная скважина: 26 добывающих и 15 нагнетательных. На участке утверждена и сформирована 5-точечная система разработки, плотность сетки скважин 32 га/скв. Участок характеризуется однотипной работой скважин с входными дебитами по нефти 9 т/сут, по жидкости – 15 т/сут в среднем при обводненности 41 %. Наблюдается снижение дебитов скважин в процессе эксплуатации. На дату анализа дебит по жидкости составляет 8,6 т/сут, по нефти – 3 т/сут при обводненности скважинной продукции – 66 %.

Накопленная добыча нефти составляет 105 тыс.т, на одну скважину приходится в среднем 1,7 тыс. т или 1,4 тыс. т на 1 метр нефтенасыщенной толщины добывающей скважины.

Отдельный анализ работы скважин, которые не были обводнены в результате закачки воды, показал, что их дебит по жидкости в среднем составляет 6,8 т/сут, а по нефти – 3,3 т/сут. Средняя обводненность составляет 51 %. Накопленная добыча нефти по этим скважинам составляет 95,2 тыс. т: 9,5 тыс. т на одну скважину или 1,5 тыс. т на 1 метр вскрытой нефтенасыщенной толщины.

Произведением начальных геологических запасов на утвержденный коэффициент извлечения нефти была определена средняя по участку плотность запасов нефти, которая составила 52 тыс. т / 32 га или 7,2 тыс. т. / 32 га / м.

Исходя из анализа, можно заключить, что происходит неравномерная выработка запасов нефти из-за того, что добыча нефти и показатели обводненности по 2 группам скважин (высоко- и низкообводненные) не согласуются.

Фактическая нефтеотдача по участку находится намного ниже проектной величины. По продолжительности добычи со стабильной обводненностью можно сделать вывод, что отобрано 30 % от извлекаемых запасов нефти.

В 5 добывающих скважинах проводились работы по снижению забойного давления максимальную величину – 4 МПа и минимальную – 1,8 МПа.

Среднее на дату анализа забойное давление составляет 15,4 МПа (при давлении насыщения 9,3 МПа).

На основе данных о результате этих работ можно сделать следующие выводы:

- снижение забойного давления сопровождалось ростом дебитов скважин по жидкости за счет увеличения притока нефти и снижения обводненности скважин;
- продолжительность технологического эффекта составила 6 месяцев, за которые средний дебит по нефти составил 6,8 т/сут (против 4,6 т/сут до оптимизации), максимальный дебит был зафиксирован на уровне 8 т/сут;

- в ходе работ наблюдалось постепенное снижение дебита по нефти и рост обводненности скважин.

Нагнетательные скважины характеризуются однотипной работой с устьевым давлением равным 15,2 МПа и начальной приемистостью 84,7 м³/сут, при текущей – 21,3 м³/сут. Снижение приемистости обусловлено низким значением пьезопроводности пласта.

Участок 2 представлен низкой степенью концентрации коллекторов в общей глинистой толще, но проницаемость в среднем выше, чем по северной части 1 участка.

Участок был введен в разработку в 2007 году. На момент анализа на нем пробурено 47 скважин, из которых 33 добывающих и 14 нагнетательных. На участке утверждена и находится в стадии формирования 9-точечная система разработки с плотностью сетки скважин равной 16 га/скв.

Начальные дебиты в среднем по жидкости и нефти составляют 31,9 и 21,2 т/сут соответственно при начальной обводненности равной 33,5 %. По трем скважинам было зафиксировано обводнение, вызванное прорывом нагнетаемой воды. Средние дебиты по жидкости и нефти по данным скважинами составляют 47,3 и 7,4 т/сут соответственно, обводненность 84 %. Накопленная добыча нефти по участку составляет 54,7 тыс. т или 18,2 тыс. т на скважину (4,2 тыс. т / скв / м).

По скважинам, не обводненным нагнетаемой водой, зафиксированы следующие показатели:

- дебит по жидкости 22,7 т/сут;
- дебит по нефти 15,4 т/сут;
- обводненность 32 %;
- накопленная добыча 3,5 тыс. т нефти на скважину (0,7 тыс.т / скв. / м).

Средняя рассчитанная плотность извлекаемых запасов нефти составляет 19,3 тыс. т / 16 га или 3,8 тыс. т на 16 га на 1 метр нефтенасыщенной толщины.

Участок 2 характеризуется достаточно равномерной выработкой запасов нефти, так как накопленная добыча нефти хорошо согласуется с обводненностью скважин. Показатель нефтеотдачи практически равен утвержденной величине.

Период работы скважин с обводненностью на уровне 30 % указывает на степень отбора извлекаемых запасов равную 40 %.

Снижение забойного давления при выполнении работ в 4 добывающих скважинах производилось с 20,9 МПа до 12,5 МПа и с 15,3 до 13,3 МПа – максимальное и минимальное соответственно. В результате выполненных работ установлено, что:

1. Увеличение депрессии сопровождается ростом дебита по жидкости при увеличении дебита по нефти и уменьшении процента обводненности.

2. Технологический эффект составил 5 месяцев, за которые средний дебит по нефти составил 17 т/сут, при достижении максимального значения – 25 т/сут. Дебит до работ был равен 10 т/сут.

3. Со временем наблюдается повышение обводненности и снижение дебита по жидкости.

4. В настоящее время забойное давление по 2 участку в работающих скважинах в среднем составляет 15,3 МПа, устьевое давление нагнетательных скважин равно 15 МПа.

Участок 3 на момент анализа в разработку не введен.

Участок 4 разрабатывается с 2007 года. К его характерным особенностям можно отнести:

- высокую концентрацию среднепроницаемых пропластков в верхней части разреза;

- глинизацию нижней части пласта;

- наличие малоэффективных нефтенасыщенных интервалов.

Участок разрабатывается по утвержденной 9-точечной системе с плотностью сетки, равной 16 га/скв. Фактический фонд скважин равен 75, из которых 54 добывающих и 21 нагнетательных.

Средний дебит нефти скважин, которые вскрывают слабонасыщенные интервалы составил 28 т/сут при обводненности 31 %. За время разработки дебит по нефти оставался на данном уровне, практически не меняясь. До прорыва нагнетаемой воды обводненность также оставалась на начальном уровне.

Скважины, которые не были обводнены закачиваемой водой, работали с дебитом по жидкости 22 т/сут, при обводненности 33 % дебит по нефти составил 15 т/сут. На момент анализа накопленная добыча составила 360,1 тыс. т или 11,3 тыс. т / скв. Плотность извлекаемых запасов по участку составила 26 тыс. т / 16 га.

По скважинам, которые вскрывают участки пласта с насыщением нефтью более 50 %, дебит по нефти составил в среднем 21 т/сут при обводненности 52 %. В процессе разработки наблюдался постоянный рост обводненности до прорыва воды от нагнетательных скважин.

Характерная для прорыва нагнетаемой воды динамика обводнения зафиксирована в скважинах №№ 1268, 1275, 1276, 1280, 1282, 1288, 1292.

Скважины, которые не были обводнены нагнетаемой водой, работали с дебитами по нефти – 8,5 т/сут при обводненностью 64 %.

Накопленная добыча нефти по 4 участку составила 89 тыс. т или 9 тыс. т на скважину. Плотность извлекаемых запасов нефти по участку составила 33 тыс. т на 16 га.

Можно заключить, что показатели накопленной добычи нефти по участку в обеих группах скважин (обводненные и необводненные нагнетаемой водой) довольно хорошо согласуются и указывают на равномерную выработку запасов. Для насыщенных нефтью более 50 % интервалов коэффициент нефтеотдачи близок к утвержденному значению. Для слабонасыщенных интервалов показатели нефтеотдачи существенно отстают от проектных значений. Стабильный период отбора нефти можно отнести только к скважинам, вскрывающим интервалы с хорошим насыщением нефти. По данным можно заключить, что отбор соответствует 60 % от начальных извлекаемых запасов нефти.

К 5 участку приурочены в основном среднепроницаемые интервалы в верхней части разреза и их низкая концентрация в нижней и центральной частях пласта. На момент анализа фонд пробуренных скважин составляет 105 единиц, из которых 73 добывающих и 32 нагнетательных.

На участке сформирована 9-точечная система разработки, плотность сетки скважин составляет 16 га/скв. Начальные дебиты скважин составляют 21 и 19

т/сут по жидкости и нефти соответственно. Начальная обводненность 7,3 %. Характерная для прорыва нагнетаемой воды динамика добычи зафиксирована в 9 скважинах рассматриваемого участка.

Дебит по нефти обводненных от нагнетательных скважин водой составляет 6,5 т/сут при обводненности 85 %, накопленная добыча 358 тыс. т или 40 тыс. т на скважину.

Дебит нефти необводненных нагнетаемой водой скважин составляет 10 т/сут при обводненности 43 %. Накопленная добыча составляет 840 тыс. т нефти или 15 тыс. т на скважину.

Плотность извлекаемых запасов в среднем по участку равна 32 тыс. т на 16 га.

Подводя итоги, можно заключить, что наблюдается хорошее согласование накопленной добычи нефти по низко- и высокообводненным скважинам. Только 10 % скважин работают со стабильной обводненностью. Текущий отбор соответствует 40 % от начальных извлекаемых запасов нефти.

Вышеуказанные технологические показатели разработки позволяют сделать вывод о том, что наименьшими дебитами характеризуются скважины участка 1 пласта АС. Обводненность по некоторым скважинам достигает 75% при дебите по жидкости – 10,5 т/сут, по нефти – 2,6 т/сут. Обводнение скважин обусловлено прорывом закачиваемой воды от нагнетательных скважин.

3.2.3 Выбор скважины-кандидата для применения акустического воздействия

В качестве скважины-кандидата рекомендуется скважина № 5, вскрывающая пласт АС на участке 1. Скважина характеризуется низкими показателями дебита 2,6 т/сут по нефти при обводненности 80 %.

На графике (рисунок 3.4) представлена динамика дебита скважины.

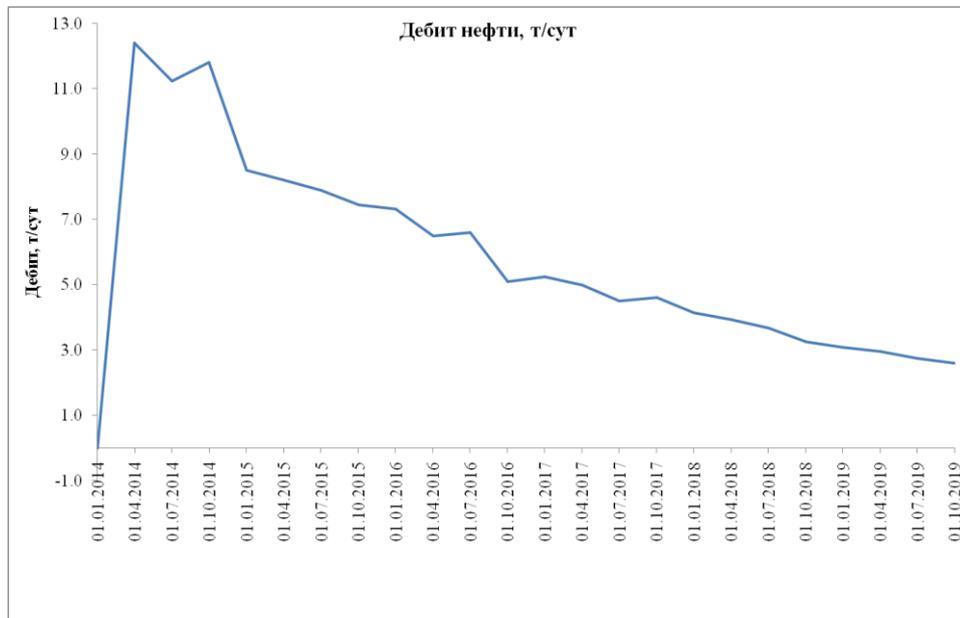


Рисунок 3.4 – Дебит нефти. Скважина № 5 пласта АС

Профиль выработки запасов с указанной скважиной представлен на рисунке 3.5.

Видно, что перфорацией вскрыт обводненный верхний интервал пласта. Вода поступает от нагнетательной скважины справа, а нижняя часть перфорированного интервала, которая содержит запасы нефти, не активна.

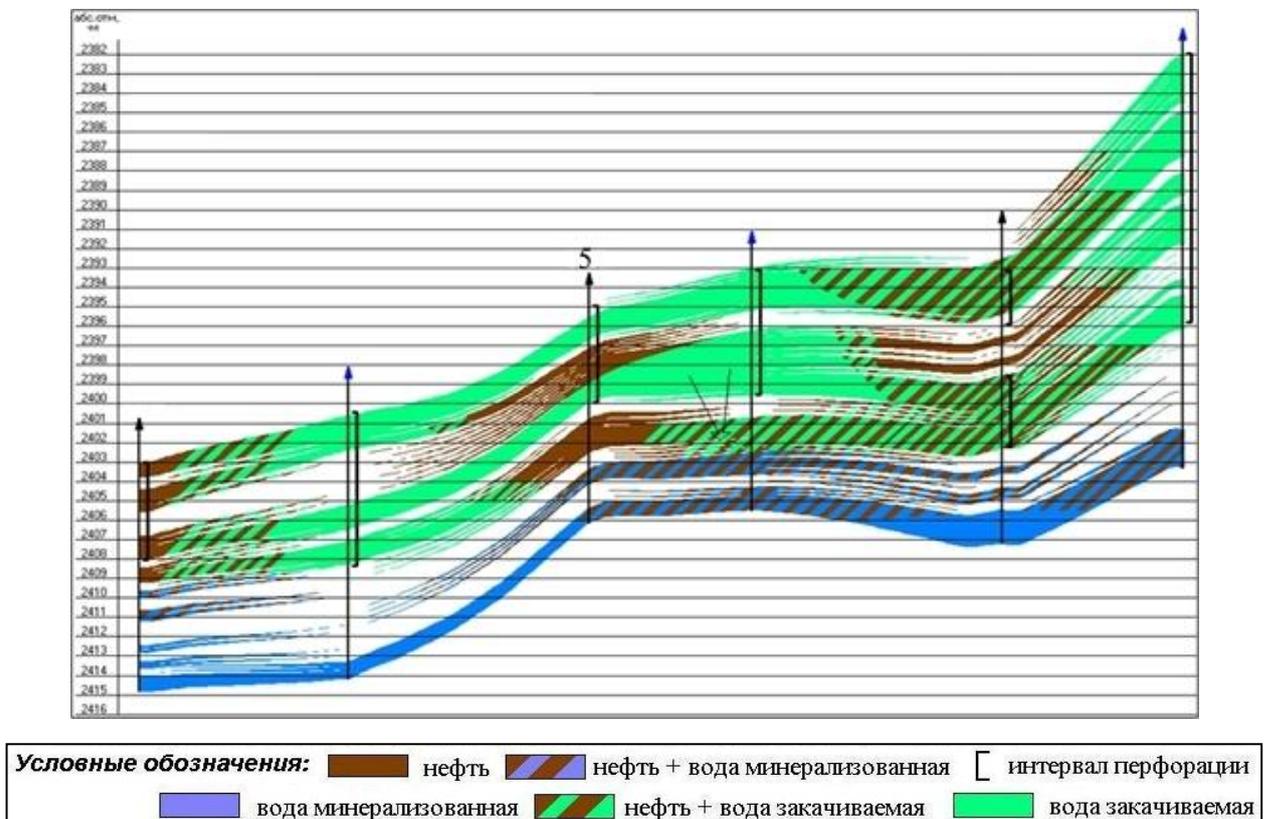


Рисунок 3.5 – Профиль выработки и заводнения толщины пласта АС

Предполагается, что установка акустического излучателя напротив нефтенасыщенного интервала позволит повысить подвижность запасов и снизить критический градиент давления начала фильтрации, что приведет к повышению дебита скважины по нефти.

3.2.4 Описание параметров моделирования

Моделирование проводилось с использованием программы Eclipse на основании геологической модели пласта, построенной в программе компании Schlumberger.

При построении геологических моделей расстояние по осям между узлами сетки принято равным 100 м, опираясь на неоднородность структурного плана и значения плотности геолого-геофизических наблюдений.

На рисунке 3.6 приведены показатели расчлененности и эффективной толщины разрезов. Сравнение данных РИГИС и эффективных толщин геологической модели приводится на рисунке 3.7.

Общий вид структурного каркаса пласта представлен на рисунке 3.8.

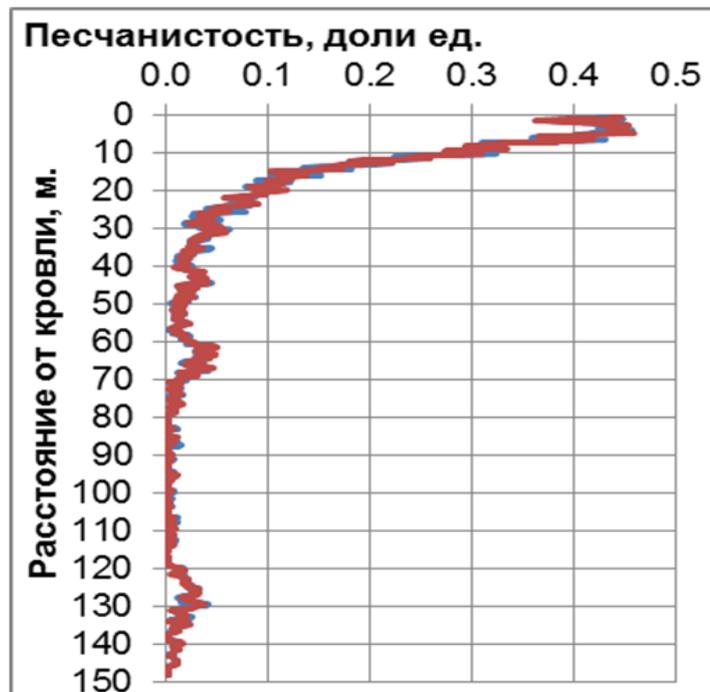


Рисунок 3.6 – Геолого-статистические разрезы по РИГИС и геологическим моделям

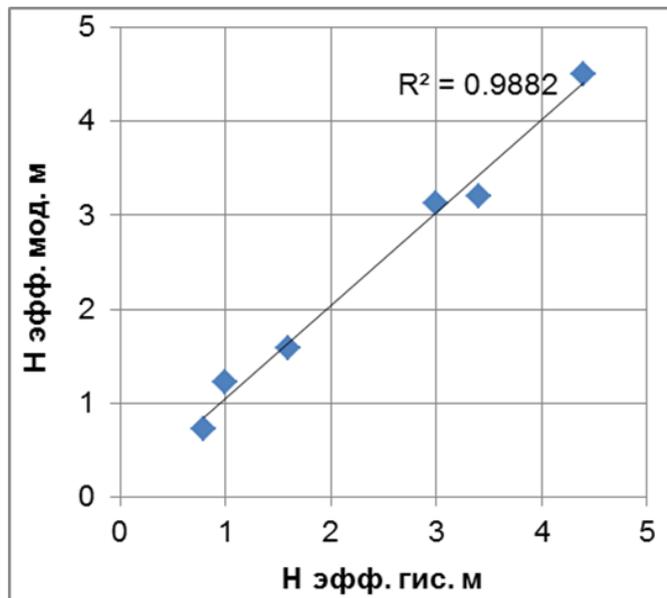


Рисунок 3.7 – Точечные диаграммы значений эффективных толщин по РИГИС и геологическим моделям

Представленные материалы указывают на достаточно хорошее воспроизведение в геологических моделях фактического строения пластов.

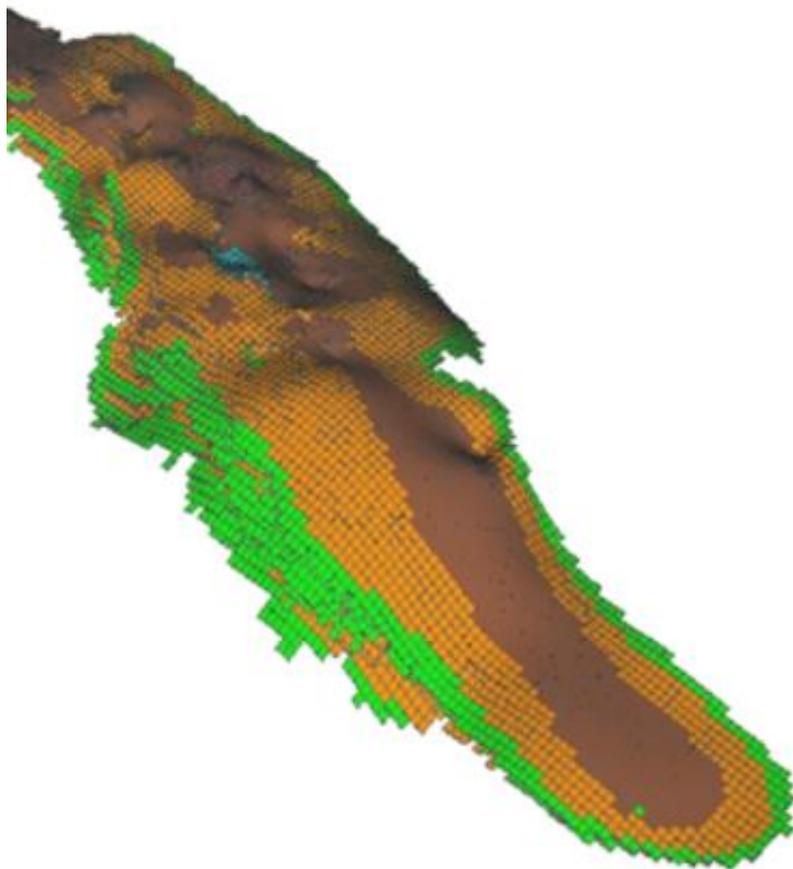


Рисунок 3.8 – Общий вид структурного каркаса пласта АС

Геологические объекты были разбиты по вертикали на элементарные слои в соответствии с существующей моделью осадконакопления. Объем пласта, находящийся между структурными поверхностями, был разделен на одинаковое количество пропластков, толщина которых менялась пропорционально.

Средняя толщина прослоев модели не превышает 0,4 метров, что создает высокое разрешение для более детального построения границ и вычленения наиболее тонких прослоев.

В ходе моделирования были рассмотрены 2 сценария:

1) работа скважины без вмешательств и без внедрения каких-либо геолого-технических мероприятий;

2) моделирования результатов лабораторных экспериментов: снижение критического градиента давления начала фильтрации и повышение коэффициента подвижности в области воздействия.

3.2.5 Результаты моделирования

В ходе моделирования акустического воздействия дебит скважины по жидкости увеличился с 12,9 до 14,0 т/сут, дебит по нефти с 2,6 до 3,6 т/сут. Технологическую эффективность за 2 года работы скважины можно оценить в 777,6 т дополнительно добытой нефти.

Графики дебита скважины по нефти и по жидкости, а также графики обводненности для базового варианта и прогнозного варианта с применением технологии акустического воздействия (АВ) представлены на рисунках 3.9, 3.10.

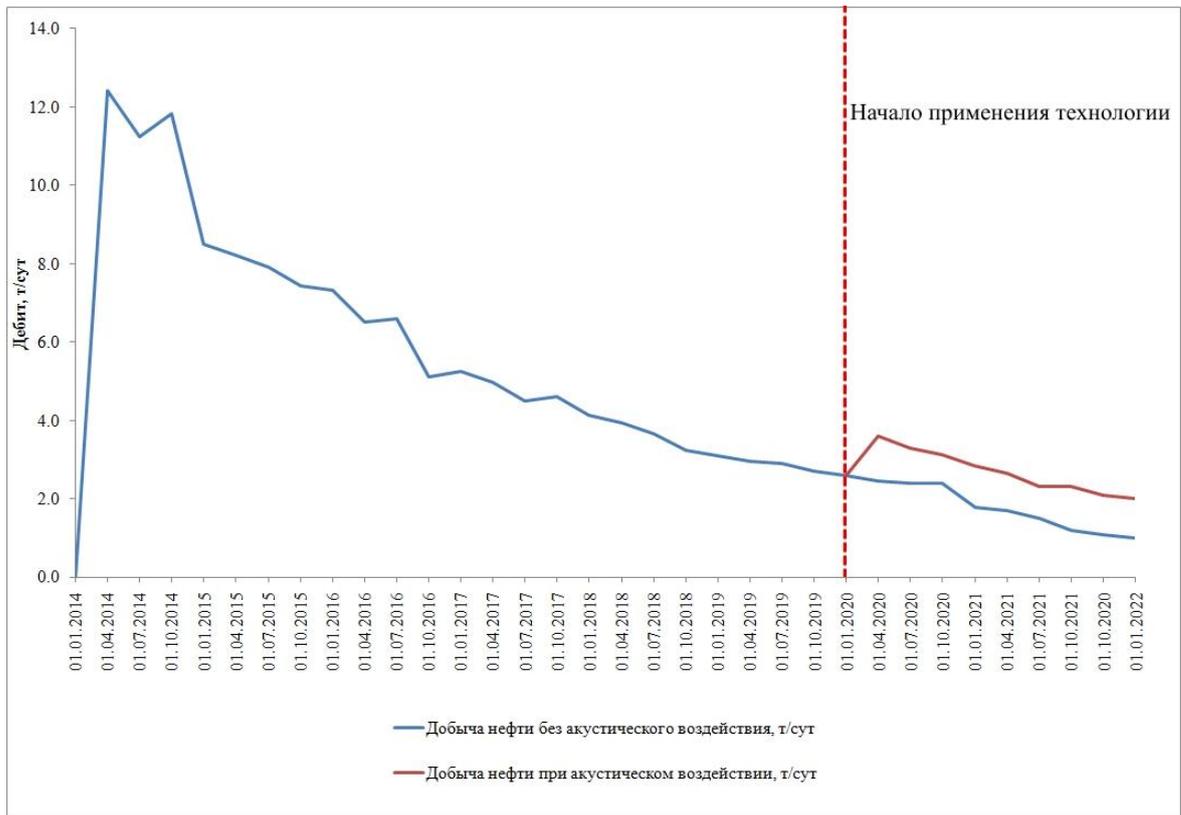


Рисунок 3.9 – Дебит нефти скважины № 5

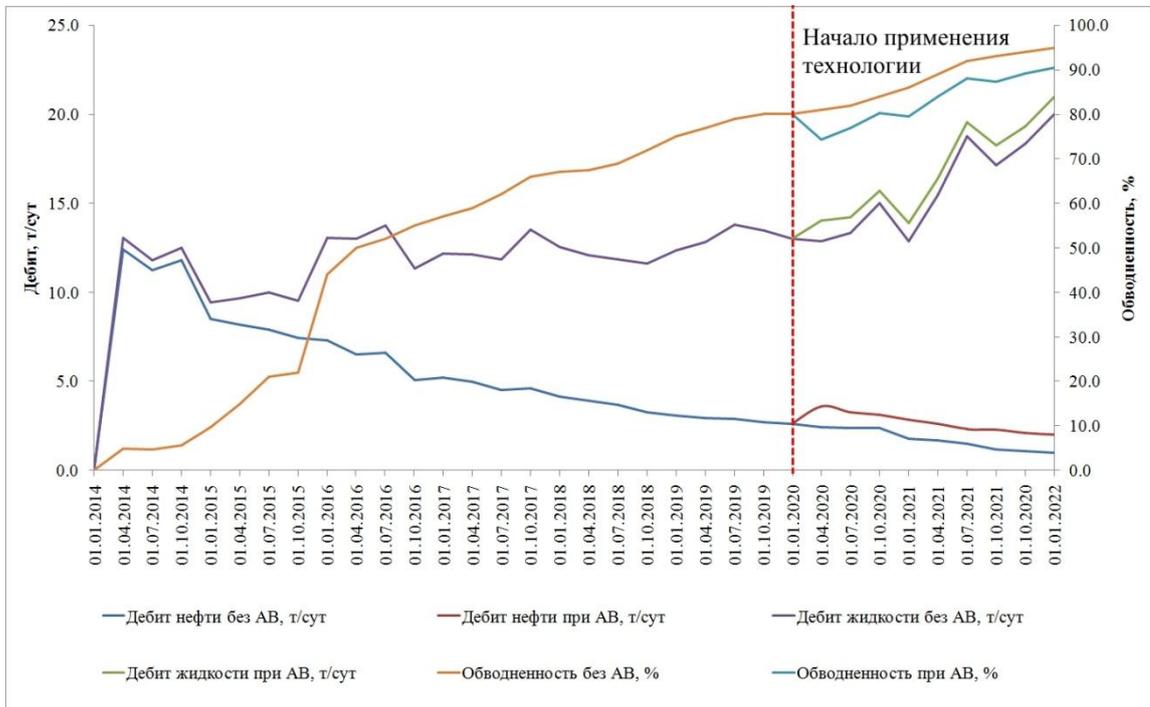


Рисунок 3.10 – Дебит скважины № 5 по нефти, жидкости и обводненность Кубы нефтенасыщенности без воздействия и при акустической обработке представлены на рисунках 3.11, 3.12.

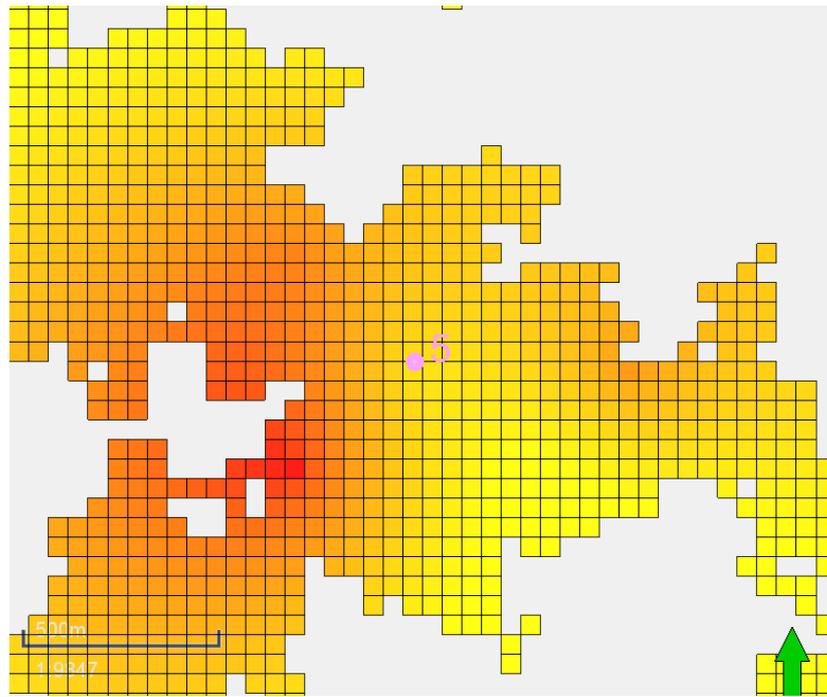


Рисунок 3.11 – Нефтенасыщенность в области скважина № 5 на момент начала расчета модели

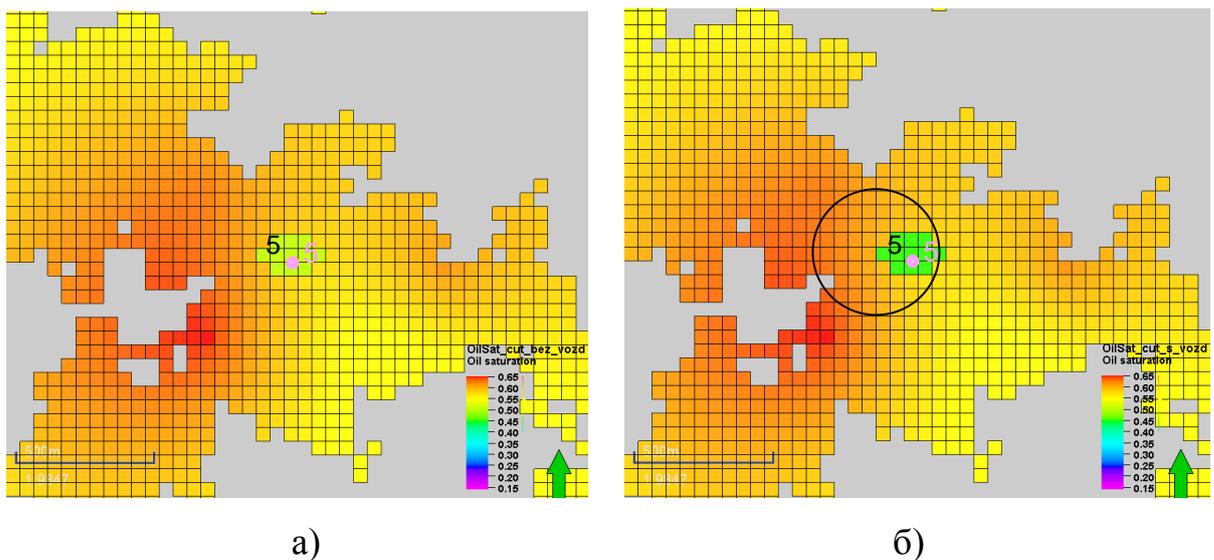


Рисунок 3.12 – Нефтенасыщенность в области скважины № 5 после 2 лет эксплуатации: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии

Экономическая оценка показала рентабельность акустической обработки. Оценка проводилась путем расчета затрат на электричество для работы акустического генератора и сопоставления их с рыночной стоимостью нефти, полученной за счет проведения мероприятия.

Для работы установки было затрачено:

$$S = 0,001 \cdot N \cdot t \cdot d \cdot p, \quad (3.1)$$

где S – денежные затраты на электроэнергию, тыс. руб.;

N – потребляемая мощность установки, кВт;

t – количество рабочих часов в сутки, ч;

d – количество рабочих суток в году, сут;

p – цена за 1 кВт электроэнергии для предприятия, руб.

Таким образом, затраты на электроэнергию составят:

$$S = 0,001 \cdot 4 \cdot 24 \cdot 720 \cdot 8 = 552,96 \text{ тыс. руб.}$$

Рыночная цена 1 т нефти на момент анализа составляет 3,6 тыс. руб. Тогда стоимость дополнительно добытой нефти составит:

$$3,6 \cdot 777,6 = 2799,36 \text{ тыс. руб.}$$

Экономическая выгода внедрения акустического воздействия составит:

$$2799,36 - 552,96 = 2246,4 \text{ тыс. руб.}$$

Полученный результат можно считать удовлетворительным для расчета рентабельности внедрения акустического воздействия, так как 2246,4 тыс. руб. дополнительной прибыли с одной скважины за 2 года является положительным денежным потоком для нефтегазодобывающего предприятия.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАСТЬ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА С ОСТАТОЧНЫМИ ЗАПАСАМИ НЕФТИ С ЦЕЛЬЮ ВОВЛЕЧЕНИЯ ИХ В РАЗРАБОТКУ

4.1 Механизм локального воздействия на область с невыработанными запасами нефти акустическими колебаниями

В ходе исследования природы и свойств упругих колебаний была выдвинута гипотеза о том, что в продуктивном пласте возможно создать акустическое поле таким образом, чтобы в области с остаточными запасами нефти (целиками нефти) создать наиболее интенсивное акустическое воздействие, а в окрестностях – акустическое поле с минимальной интенсивностью, что способствует вовлечению углеводородов в процесс дренирования [76]. Для математического моделирования подобного поля упругих колебаний необходимо учесть особенности распространения акустических волн в пористой среде, насыщенной жидкими флюидами. В данном разделе рассмотрены особенности распространения акустических колебаний от нескольких источников в нефтяном пласте, их затухание и взаимное наложение (в том числе явление интерференции). Путем моделирования процесса эксплуатации нефтяного пласта представлена оценка потенциала внедрения рассматриваемой технологии акустического воздействия на межскважинную зону в процессе разработки.

Как известно из теории фильтрации, флюиды продвигаются в пласте из области повышенного давления в область пониженного. Однако распространение так называемой воронки депрессии ограничено областью влияния конкретной добывающей скважины и приравнивается к зоне дренирования. С другой стороны, поддержание пластового давления возможно благодаря закачке рабочего агента через нагнетательные скважины, в зоне работы которых создается локальное повышение давления или зона репрессии. Однако существуют области пласта, охватить которые влиянием нагнетательных и добывающих скважин бывает затруднительно ввиду реализованной системы разработки, определяемой

технологической эффективностью производства (рисунок 4.1). Особенно сильно проблема выражена для объектов, разрабатываемых по 5-точечной системе воздействия (рисунок 4.2).

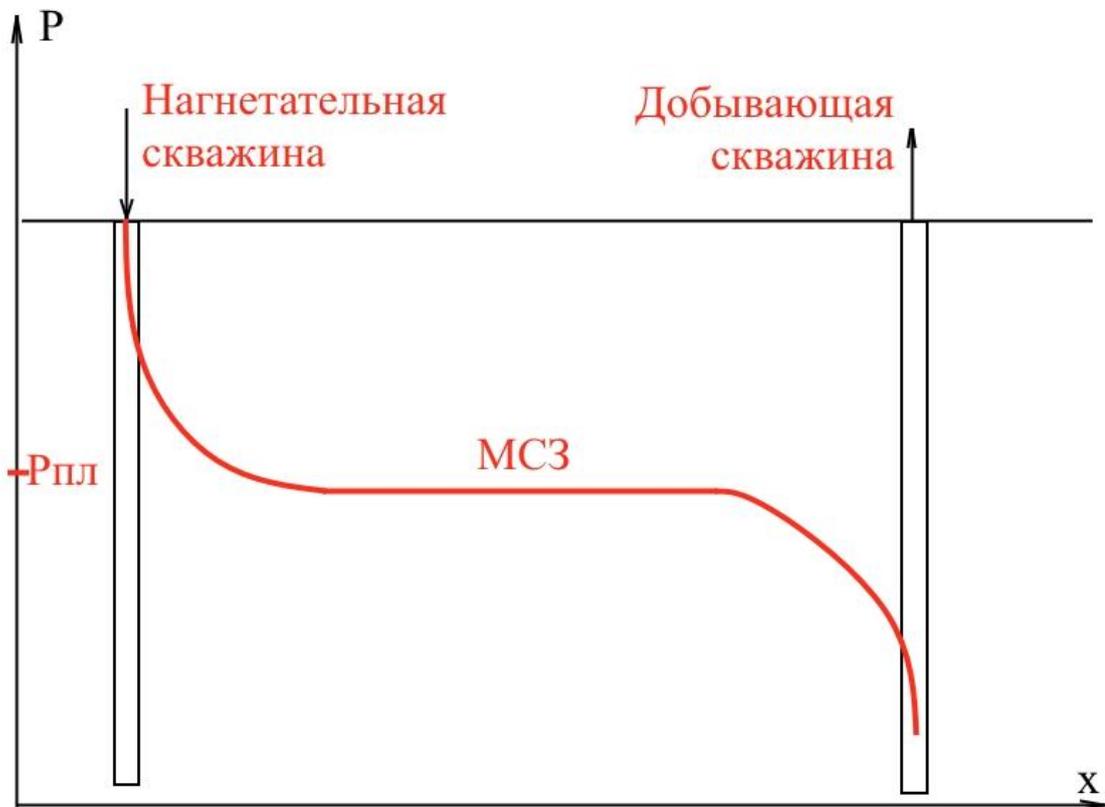


Рисунок 4.1 – Распределение давления в межскважинной зоне пласта

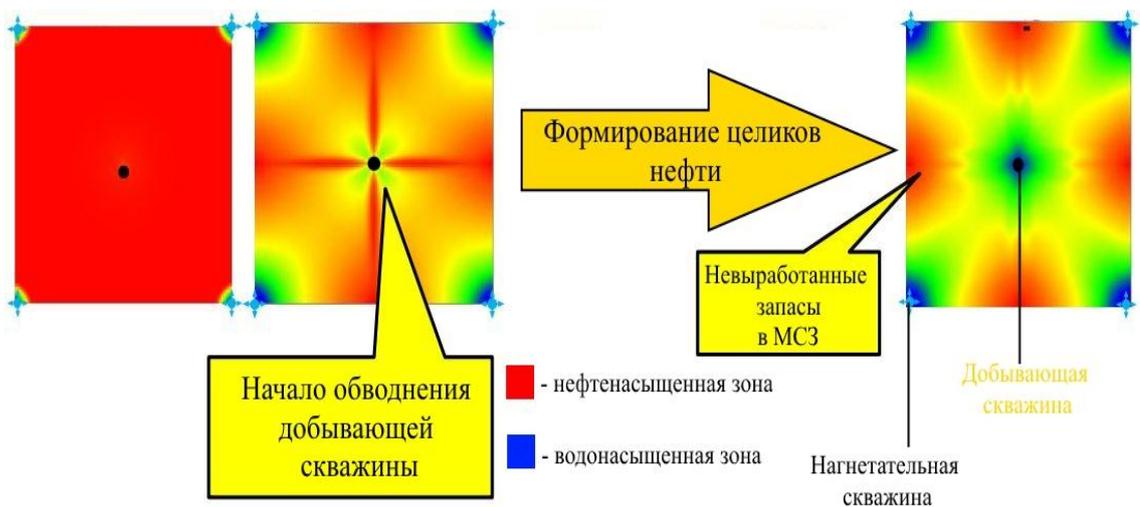


Рисунок 4.2 – Формирование целиков нефти при 5-точечной системе разработки

Рассмотрим возможное решение проблемы с точки зрения распространения акустических колебаний в пласте. В разделе 1 данной работы представлены

результаты промышленного применения акустических технологий воздействия на пласт, которые свидетельствуют о дополнительной добыче нефти из областей пласта, содержащих остаточные углеводороды или не охваченных процессом вытеснения закачиваемыми агентами. Как правило, такие технологии используют в основе низкочастотное воздействие упругими колебаниями при помощи поверхностных или внутрискважинных источников.

Акустические колебания, распространяющиеся в среде, подчиняются единым волновым законам. И для них характерны общие явления, такие как отражения и преломления волн на границе раздела сред, рассеяние на неоднородностях, рефракция, поглощение энергии и интерференция [77, 78].

Подробнее стоит остановиться на явлении интерференции. Интерференцией волн является сложение в пространстве двух и более волн, при котором в разных точках среды происходит усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Эффект интерференции наблюдается у волн любой природы, в том числе акустических колебаний. На рисунке 4.3 представлена интерференционная картина, полученная путем наложения волн от 2-х источников колебаний.

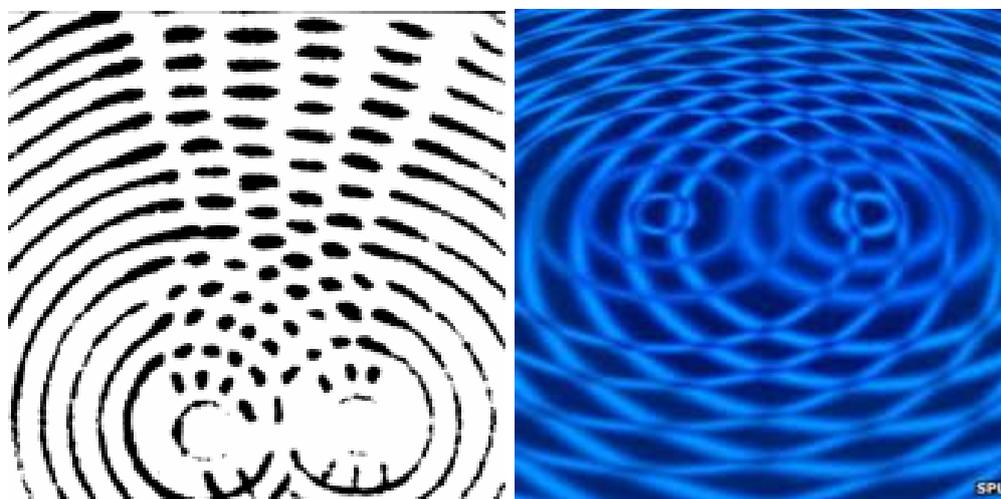


Рисунок 4.3 – Интерференционная картина при наложении упругих волн, исходящих от двух источников колебаний

Зачастую интерференционная картина наблюдается при наложении друг на друга бегущей и отраженной от границы раздела волн. В таких случаях может наблюдаться образование стоячей волны (рисунок 4.4).

Минимальное отклонение амплитуды от равновесного состояния является узлом стоячей волны, а максимальная амплитуда – пучностью.

В стандартном случае энергия не переносится стоячей волной, но при этом происходит ее обмен в единичном объеме, который составляет одну четвертую часть от длины волны между пучностью и узлом.

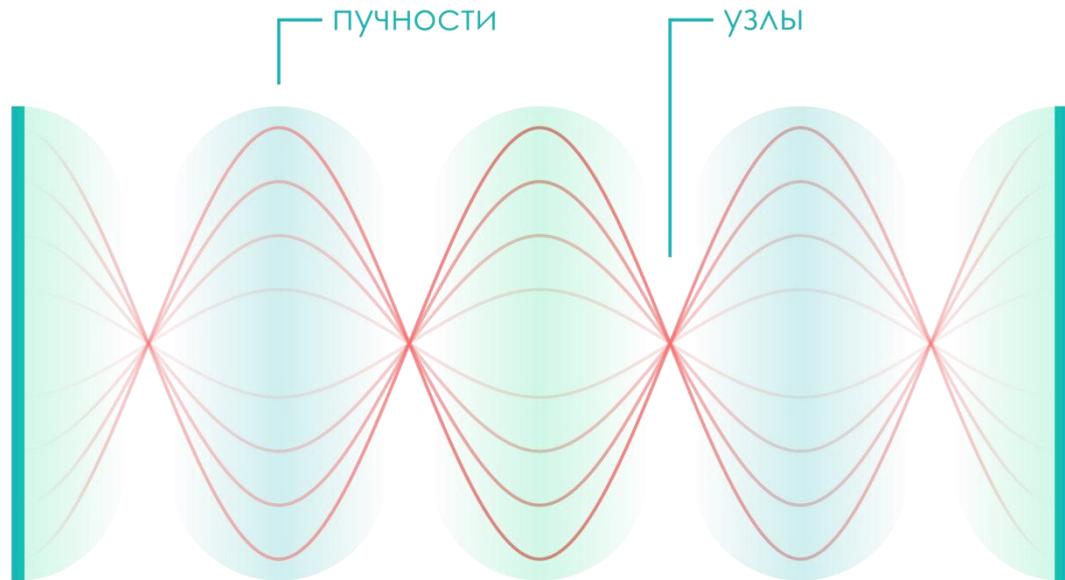
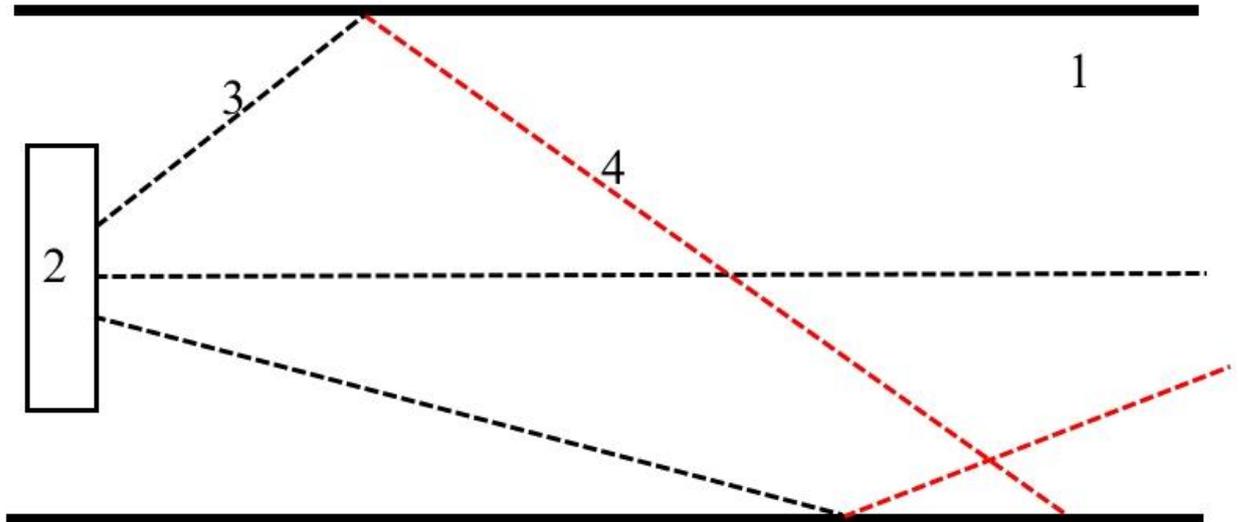


Рисунок 4.4 – График колебаний стоячей волны

На рисунке 4.4 показано, что при образовании стоячих волн за счет эффекта интерференции в некоторых точках среды амплитуда колебаний достигает своего максимума, в то время как в других точках образуются, так называемые пучности, в которых колебания отсутствуют.

Нефтяной пласт можно рассматривать как природный волновод (рисунок 4.5), ограниченный сверху и снизу кровлей и подошвой соответственно. Кровля и подошва пласта характеризуются отличными от самого пласта акустическими свойствами.

Кроме того, продуктивный пласт характеризуется анизотропией геолого-физических свойств, что в свою очередь приводит к тому, что амплитуды прямой и отраженной волн будут не равны между собой [79]. Таким образом, стоячая волна будет характеризоваться бегучестью, выраженной через отношение амплитуд прямой и отраженной акустических волн.



1 – нефтяной пласт, 2 – акустический излучатель, 3 – прямая волна от излучателя, 4 – отраженная волна.

Рисунок 4.5 – Картина возникновения конструктивной интерференции в нефтяном пласте при отражении волн от кровли и подошвы

Эту особенность важно учитывать при проектировании акустического воздействия, так как взаимное наложение прямых (поступающих непосредственно от источника колебаний) и отраженных от подошвы и кровли волн будет приводить к усилению амплитуды упругих колебаний, а значит – к повышению расстояния распространения воздействия.

При соблюдении следующего равенства в пласте будет возникать интерференция, определяемая его геометрией:

$$h = (2n-1)\lambda/4, \quad (4.1)$$

где h – мощность пласта, м;

n – натуральное число;

λ – длина волны, м.

То есть, так называемая "конструктивная" интерференция в нефтяном пласте может возникать при нечетном количестве четвертей длины колебания, приходящихся на его мощность [80, 81]. Таким образом, при соблюдении

уравнения (4.1) акустическая энергия практически не выходит за область продуктивного пласта, что способствует дальнейшему проникновению воздействия.

Преобразуя уравнение (4.1), можно определить искомые частоты генерируемых акустических волн, способных распространяться дальше в пласт от источника:

$$f = \frac{(2n-1) \cdot c}{4h}, \quad (4.2)$$

где f – частота излучаемых колебаний, Гц.

Таким образом, учитывая мощность пласта, можно подбирать частоты генерируемых колебаний для обеспечения максимального проникновения волны в пласт. Важно учитывать эту особенность в дальнейшем при моделировании и подборе характеристик акустического воздействия.

Особенности влияния стоячей и бегущей волн на распределение напряжения и давления в пласте отличаются. Стоячая волна не приводит к переносу энергии от источника колебания. Она лишь способствует локальному формированию зон пониженного и повышенного давления. Стоячая волна также формируется напряжением и совпадает с деформационной волной. В этом случае наблюдаются синфазные колебания деформационной волны и волны напряжения, при этом максимум амплитуды находится в нулевой области смещения частиц.

В совокупности эти волны формируют в пласте области с упруго деформированным напряженным состоянием, которые не изменяются в течение всего времени работы источника колебаний.

Результатом этих процессов является возникновение локальных градиентов давления, способствующих приведению флюида в движение.

Следует отметить, что локальное повышение градиента давления как вдоль напластования, так и в вертикальной плоскости может происходить в каждом из слоев, составляющих продуктивный пласт. Тем самым может обеспечиваться вовлечение в разработку пропластков коллектора с низкой проницаемостью [82].

Выше была рассмотрена интерференционная картина в вертикальной плоскости, определяемая главным образом мощностью пласта, в котором происходит распространение акустических колебаний. Однако гипотеза локального акустического воздействия предполагает наложение волн, распространяющихся по латерали. Чтобы лучше понять эффекты, которые можно использовать для получения промыслового результата, можно обратиться к относительно новому научному направлению – «киматике».

Киматика является подразделом науки о модальных явлениях и изучает вибрацию и звук посредством визуального представления. Понятие «киматика» было впервые представлено швейцарским учёным Хансом Йенни, однако фактически он продолжил работу немецкого ученого Эрнста Хладни, который экспериментировал со звуком. Хладни использовал песок, рассыпанный на стеклянной пластине, для наблюдения за формированием песчинками симметричных узоров при проведении смычком по краю пластины [83-86]. Примеры полученных узоров представлены на рисунке 4.6.

Вибрации воздуха приводят к образованию на поверхности эффекта интерференции, что способствует появлению областей с пониженным и повышенным давлением, что в свою очередь заставляет твердые частицы или жидкости мигрировать по этим областям, создавая визуальные эффекты (рисунок 4.6). Эти визуальные образы повторяют минимумы и максимумы стоячей звуковой волны, появляющейся в процессе интерференции волны самой с собой. Принцип заключается в следующем: отсутствие твердых или жидких частиц определяет область, где давление сильнее (то есть точки максимума акустического поля), а в зонах, в которых сосредоточены частицы – давление минимальное. Можно заметить, что причина возникновения подобных картин кроется в распределении поля давлений при наложении акустического поля. Различные характеристики приложенного к наблюдаемой среде поля упругих колебаний будут приводить к формированию различного распределения областей повышенного и пониженного давления. Визуально это выражается в перемещении частиц среды и скопление их в области пониженного давления.

Понимание этого процесса позволяет выдвинуть гипотезу, что подобное распределение давления может быть получено в нефтяном пласте, благодаря созданию упругих волн при помощи акустических внутрискважинных излучателей.

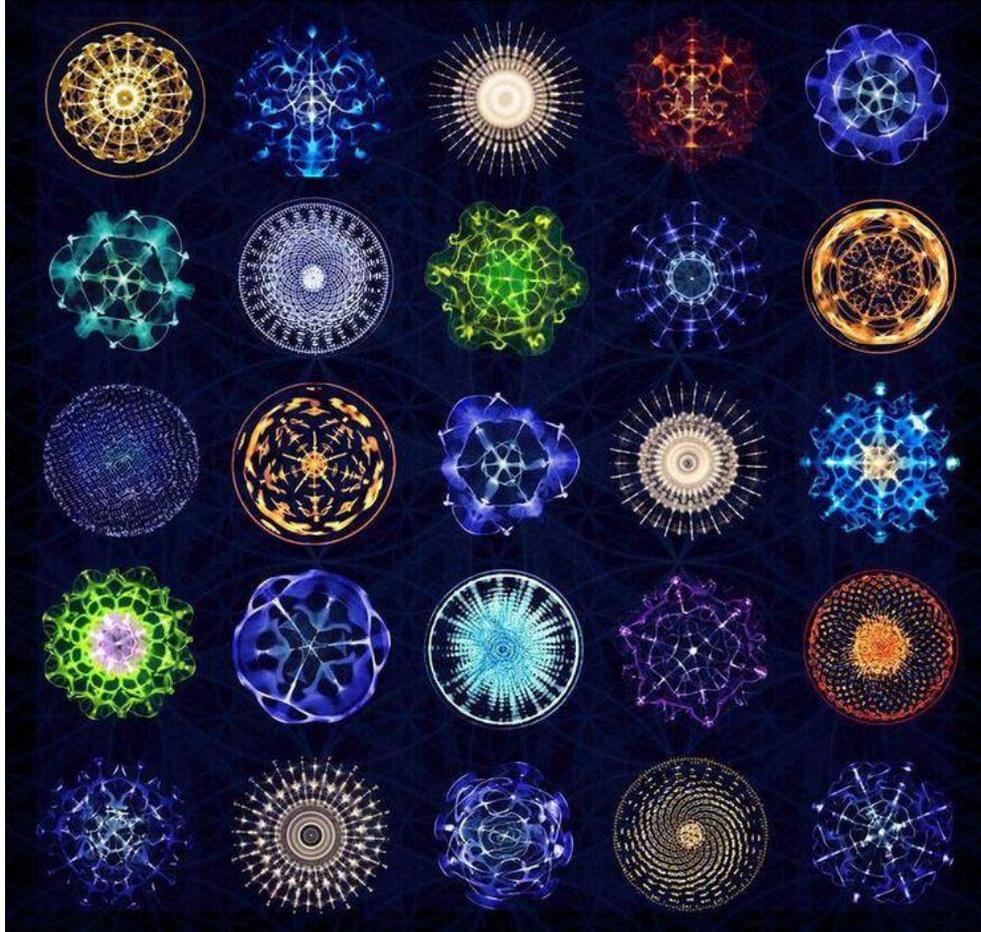
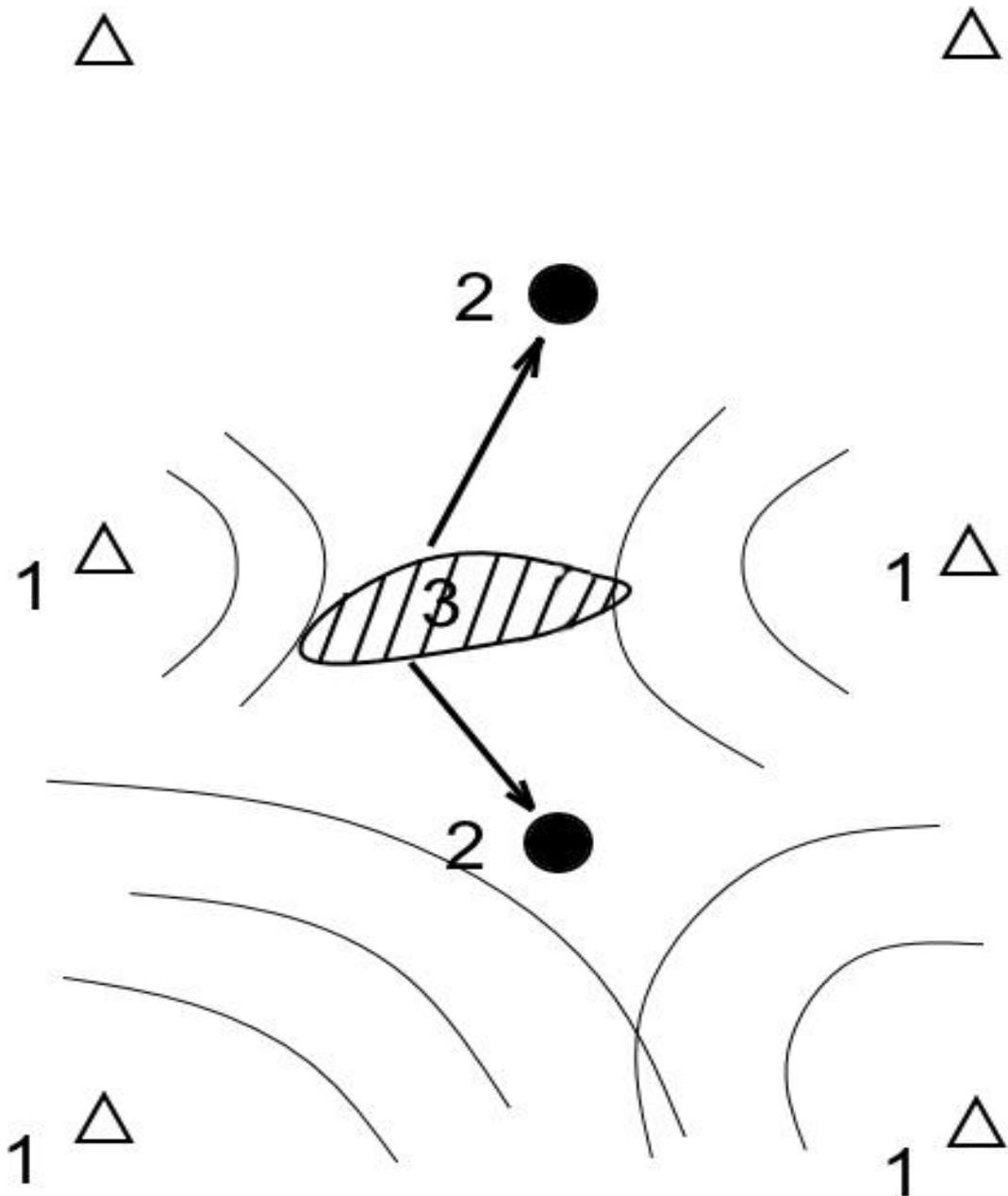


Рисунок 4.6 – Визуальная картина распределения энергии акустического поля

Принцип этого процесса проще понять на примере шприца, в котором создается разреженная воздушная среда, которая в свою очередь затягивает жидкость в корпус шприца. Этот принцип лежит в основе функционирования термометров и барометров: давление в среде меняется относительно друг друга при изменении внешней температуры. Однако, в данном случае создается стоячая акустическая волна, которая приводит к возникновению перепадов давления в воздушной среде. Эти перепады давления приводят к перераспределению частиц песка, выстраивая их в определенные узоры.

Принимая во внимание данный эффект, можно предположить, что путем генерации определенной негармонической волны колебаний в продуктивном пласте возможно также создавать области пониженной и повышенной интенсивности воздействия, что приведет к вовлечению остаточных запасов в разработку (рисунок 4.7).



1 – нагнетательные скважины, в которых размещены источники колебаний, 2 – добывающие скважины, 3 – область с невыработанными запасами, в которой эффект от акустического воздействия максимален

Рисунок 4.7 – Принципиальная схема воздействия на продуктивный пласт

Далее рассмотрены физические особенности распространения акустических колебаний в насыщенной пористой среде продуктивных пластов.

4.2 Распространение акустических волн в насыщенных пористых средах

Волной можно назвать любое изменение состояния определенной среды, распространяющееся с конечной скоростью и несущее определенное количество энергии. Все волны, изученные современной физикой, можно разделить на два вида: упругие и электромагнитные. В данной работе рассматриваются именно упругие волны, другое название которых – акустические. Это волны, характеризующиеся колебаниями частиц при механической деформации среды (жидкой, газообразной или твердой). В этом процессе происходит перенос энергии упругой деформации при отсутствии переноса вещества. Некоторые источники [87] отдельным понятием определяют звук как акустические колебания, распространяющиеся в воздушной среде. Однако, с точки зрения автора, нет четкого разграничения между понятиями звуковой и акустической волны – обе они по своему роду являются упругими колебаниями.

При смещении частиц происходит формирование областей их сжатия и разрежения, что локально вызывает повышение и понижения давления [88 – 91].

Акустическое поле можно рассматривать как совокупность упругих волн. Акустические поля описываются скалярными функциями и называются скалярными полями.

Упругая волна, также как и любой движущийся единичный объем, несет в себе энергию от одной точки пространства к другой. При этом происходит перенос энергии, однако сами по себе частицы вещества не перемещаются в другую точку пространства. Величина энергии, переносимая волной, может меняться в широких пределах. В данной работе распространение акустического поля рассмотрено через изменение давления в каждой конкретной точке насыщенной среды в любой рассматриваемый момент времени.

Периодическую изменяющуюся во времени волну, распространяющуюся в направлении оси, можно описать следующим уравнением:

$$A(t) = A_0 \cos(2\pi f - kx + \phi), \quad (4.1)$$

где A_0 – амплитуда волны (единица измерения зависит от конкретного физического параметра, подверженного гармоническим колебаниям);

f – частота колебаний, Гц;

k – волновое число, м^{-1} ;

x – расстояние от источника колебаний, м;

ϕ – начальная фаза колебаний.

Размерность амплитуды определяется природой рассматриваемого колебания. В данной работе речь идет о распространении упругих колебаний в пласте, значит, в качестве амплитуды будет рассматриваться давление.

Насыщенный пласт является средой, в которой будут происходить потери акустической энергии, которая будет тратиться на преодоление силы трения между колеблющимися частицами и, соответственно, нагревание. Поэтому с ростом расстояния от источника, амплитуда давления будет уменьшаться по следующему закону:

$$A_0(x) = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (4.2)$$

где α – коэффициент затухания, м^{-1} .

При моделировании было принято, что волны распространяются линейно. Для линейных волн выполняется принцип суперпозиции или наложения волн. Параметры среды и скорость линейной волны не зависят от ее интенсивности. Для линейных волн существует единый теоретический подход независимо от их природы.

Известно, что жидкие и газообразные среды являются упругими. В отличие от твердых тел они не обладают формой, что исключает у них наличие такого свойства, как упругость формы. Поэтому жидкие и газообразные среды могут расширяться или сжиматься только в направлении распространения волны, то есть колебания частиц происходит только вдоль этого направления. Упругая

волна в этих средах представляет собой продольную волну с чередующимися областями сжатия и разрежения среды.

Твердая среда под действием механических сил может изменять свои размеры и форму. Теория упругости доказывает, что все виды деформаций могут быть сведены лишь к 2 типам: продольной и сдвиговой деформации.

Можно заключить, что в пласте, являющимся по сути насыщенным жидкостью твердым скелетом, могут распространяться 3 волны: продольная и поперечные акустические волны, распространяющиеся по скелету породы, и продольная волна, распространяющаяся в жидкости, насыщающей пласт.

Таким образом, необходимо определить, какие параметры будут влиять на скорость распространения и коэффициент затухания акустической волны в пласте, рассматривая в отдельности жидкую и твердую среды.

В современном представлении распространения акустических колебаний в насыщенных пористых средах общепризнанной является теория Био и Френкеля [92 – 96]. Главным свойством насыщенной жидкостью пористой среды является возможность распространения в такой среде продольных волн 2 типов и 1 поперечной волны [97, 98].

В работах Хусаинова И.Г. [99, 100] также говорится о распространении 2 типов продольных волн. К медленной волне он относит упругие колебания, которые распространяются по жидкой фазе, а к быстрой – волну, которая распространяется по скелету породы. В работе [101] автор принимает скелет несжимаемой средой и опускает распространение волны по скелету породы. В данной работе автор приводит дисперсионное уравнение для пористой среды, насыщенной флюидом, которое представляет собой уравнение четвертой степени от величины волнового числа.

Закон сохранения жидкости в порах среды можно выразить:

$$m \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (4.3)$$

где m – пористость среды, д.ед.;

$\partial \rho_l$ – изменение плотности жидкости, кг/м³;

ρ_{l0} – плотность жидкости, которая соответствует невозмущенному начальному состоянию, кг/м³;

u – скорость фильтрации жидкости, м/с.

Уравнение состояния для жидкости примет следующий вид:

$$p = C_l^2 \rho_l, \quad (4.4)$$

где C_l^2 – скорость распространения волны в жидкой фазе, м/с.

Таким образом, для распространения синусоидальных упругих колебаний, создаваемых внутрискважинным источником, вглубь пласта, насыщенного жидкими флюидами, можно записать функцию волны с учетом формул (4.1) и (4.2) в следующем виде:

$$P(x, t) = P_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi f t - Kx + \phi). \quad (4.5)$$

Хусаиновым И.Г. приводится следующая функция акустической волны с учетом преобразования (4.3 – 4.5):

$$P(x, t) = P_0 e^{[-i(2\pi f t - Kx)]}, \quad (4.6)$$

где f – частота источника колебаний, Гц;

i – мнимая единица;

K – волновое число, которое в общем случае также является комплексным:

$$K = \acute{k} + i\delta, \quad (4.7)$$

где:

$$\acute{k} = \frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} + 1}, \quad (4.8)$$

$$\delta = \frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} - 1}, \quad (4.9)$$

где t_μ – параметр, учитывающий характеристики среды и насыщающего флюида, который можно найти по следующей формуле:

$$t_\mu = \frac{k\rho_{l0}}{m\mu}, \quad (4.10)$$

где k – коэффициент проницаемости, м^2 ;

m – пористость, д.ед.;

μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Чтобы вычислить физическую величину давления или скорости фильтрации следует взять действительную часть в уравнении (4.6). Путем преобразований приведенных уравнений, находим функцию распространения акустических колебаний в пласте для жидкой фазы:

$$P(x; t) = P_0 e^{-\delta x} \cos(x\acute{k} - 2\pi f t + \phi). \quad (4.11)$$

Уравнение (4.11) было положено в основу математической модели для расчета распространения упругих колебаний в пласте от нескольких источников, размещенных в нагнетательных скважинах с целью воздействия на области с невыработанными запасами нефти и вовлечения их в разработку.

В данной работе было учтено распространение акустических колебаний как по жидкости, так и по скелету породы, слагающей продуктивный пласт.

Давление, под которым находится скелет породы зависит от горного давления, то есть давления вышележащих пластов, и пластового давления, то есть

давления насыщающих коллектор флюидов. Таким образом, можно выразить давление скелета породы следующей формулой:

$$P_{\text{ск}} = P_{\text{г}} - P_{\text{пл}}, \quad (4.12)$$

где $P_{\text{г}}$ – горное давление, действующее в целом на насыщенную пористую среду пласта коллектора, Па [102];

$P_{\text{ск}}$ – давление в скелете породы коллектора, Па;

$P_{\text{пл}}$ – пластовое давление, Па.

Коэффициент поглощения для скелета крепко сцементированного песчаника по сравнению с жидкостью будет не велик. Таким образом, определяя, что акустические колебания распространяются по твердым телам на значительно более дальние расстояния с низкими потерями энергии [103 – 106].

Различные горные породы характеризуются отличием в физических характеристиках: пористости, трещиноватости, насыщенности нефтью, водой и газом. В зависимости от этих параметров изменяются значения коэффициента поглощения акустических волн. Для метаморфических, изверженных и осадочных пород его значения находятся в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} м^{-1} , для рыхлых осадочных пород – от 10^{-3} до $0,5 \text{ м}^{-1}$. Степень поглощения энергии акустических колебаний также определяется частотой источника. Наблюдается рост коэффициента поглощения с увеличением частоты. Реальные среды, в отличие от абсолютно упругих, характеризуются различным поглощением акустических волн и различными скоростями их распространения. Данную закономерную особенность называют частотной дисперсией скорости, в результате которой процесс распространения волны от источника колебаний обуславливается изменением ее формы. Высокочастотные колебания распространяются в среде с несколько большей скоростью, однако их коэффициент поглощения также выше относительно низкочастотных сигналов. На графике профиля волны при этом наблюдается растяжение кривой зависимости амплитуды от времени, то есть происходит возрастание периода колебаний.

Для горных пород значение коэффициента поглощения изменяется в широких пределах и в некоторых случаях степень влияния литологического состава оказывается выше, чем геометрия расхождения фронта волны.

Кроме того, на ослабление амплитуды колебаний влияет геологическая характеристика среды, а именно – наличие высокой неоднородности пласта, тонкая слоистость осадочных пород. Данная структура среды приводит к многократному отражению волны, так называемому рассеиванию, от границ разных прослоев. Данный эффект особенно выражен для высокочастотного спектра колебаний.

Коэффициент затухания акустических волн, проходящих по скелету породы, взят с учетом практически полного отсутствия влияния сдвиговой вязкости. Таким образом, формула, определяющая коэффициент затухания волны в твердом теле, примет вид [87]:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{ск}^3}, \quad (4.13)$$

где $C_{ск}$ – скорость распространения акустической волны в скелете горной породы, м/с.

Учитывая (4.2) и (4.13), получим зависимость снижения амплитуды волны давления, распространяющейся по скелету породы, с увеличением расстояния от источника колебаний:

$$P_{ск}(x) = P_{0ск} \text{EXP}\left(-x \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{ск}^3}\right), \quad (4.14)$$

где $P_{ск}(x)$ – зависимость амплитуды давления в скелете породы в точке, находящейся на удалении x от источника акустических колебаний, Па;

$P_{0ск}$ – величина начальной амплитуды давления, передавшейся от источника акустических колебаний скелету коллектора, Па.

Следует учесть, что акустическая энергия, выраженная через изменение давления в насыщенной пористой среде пласта коллектора, будет передаваться от внутрискважинного источника колебаний в неравных пропорциях скелету горной породы и пластовому флюиду соответственно.

Примем полную энергию, полученную средой и передаваемую в виде продольных акустических колебаний (по скелету и по флюиду), за единицу. В работе [97] говорится, что распределение акустической энергии зависит от способа ее приложения: к скелету (жесткий поршень) или к пластовой жидкости (жидкий поршень). Генерация акустических волн от внутрискважинного источника, размещенного в необсаженной скважине, в большей степени соответствует жидкому поршню. В интервалах перфорации обсаженной скважины способ приложения нагрузки при возбуждении акустических волн приближается к «жесткому поршню».

В случае жесткого поршня, практически вся акустическая энергия сосредоточена в твердой среде скелета породы пласта. Для жидкого поршня характерна передача энергии преимущественно по пластовому флюиду, лишь частично влияя на напряженное состояние скелета пласта [107].

С точки зрения акустического воздействия на пласт с целью повышения нефтеотдачи и вовлечения невыработанных запасов в разработку, наиболее перспективным и практически реализуемым является приложение нагрузки к пластовому флюиду. Для этих целей уже разработано и успешно испытано множество различных типов внутрискважинных генераторов акустических колебаний. Однако реальные условия, при которых энергия акустических колебаний попадает в пластовую жидкость от внутрискважинного генератора, зависят не только от способа приложения волнового воздействия, но и от амплитудно-частотной пропускной характеристики системы: «скважинная жидкость – эксплуатационная колонна – цементное кольцо».

Оценим передачу акустической энергии следующей формулой:

$$P_{\text{нач}} = 0,8 \cdot P_{\text{фл}} + 0,2 \cdot P_{\text{ск}}, \quad (4.15)$$

где $P_{\text{нач}}$ – начальная амплитуда, переданная внутрискважинным акустическим излучателем насыщенному коллектору, Па;

$P_{0\text{фл}}$ – начальная амплитуда давления, переданная пластовому флюиду, Па;

$P_{0\text{ск}}$ – начальная амплитуда давления, переданная скелету породы, Па.

Тогда получается уравнение для быстрой волны, передающейся по скелету породы:

$$P_{\text{ск}}(x; t) = 0,2 \cdot P_{0\text{ск}} \text{EXP} \left(-x \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{\text{ск}}^3} \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi f x}{C_{\text{ск}}} - 2\pi f t + \phi \right), \quad (4.16)$$

и, подставляя уравнения 4.8 и 4.9 в 4.11, уравнение для медленной волны, которая передается по пластовому флюиду:

$$P_{\text{фл}}(x; t) = 0,8 \cdot P_{0\text{фл}} \text{EXP} \left(-x \frac{2\pi f}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} - 1} \right) \cdot \cos \left(x \left(\frac{2\pi f}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} + 1} \right) - 2\pi f t + \phi \right). \quad (4.17)$$

Следует учесть, что рост давления в скелете породы происходит вследствие сжатия частиц, что приводит к одновременному уменьшению ее объема и, следовательно, снижению давления в пластовой жидкости. То есть, можно заключить, что взаимное результирующее влияние быстрой волны (скелет породы) и медленной волны (пластовый флюид) на пластовое колебание пластового давления будет являться разностью волн (4.17) и (4.16).

Указанные зависимости были положены в математическую модель посредством программы Excel (Microsoft). В модели было учтено

распространение 2-х типов описанных волн (быстрая и медленная) от 4-х источников, расположенных, например, в нагнетательных скважинах.

Таким образом, при помощи расчетной модели возможно оценить изменение пластового давления с учетом наложения всех 8 полученных волн на некотором расстоянии от их источников и в любой момент времени (рисунок 4.8).

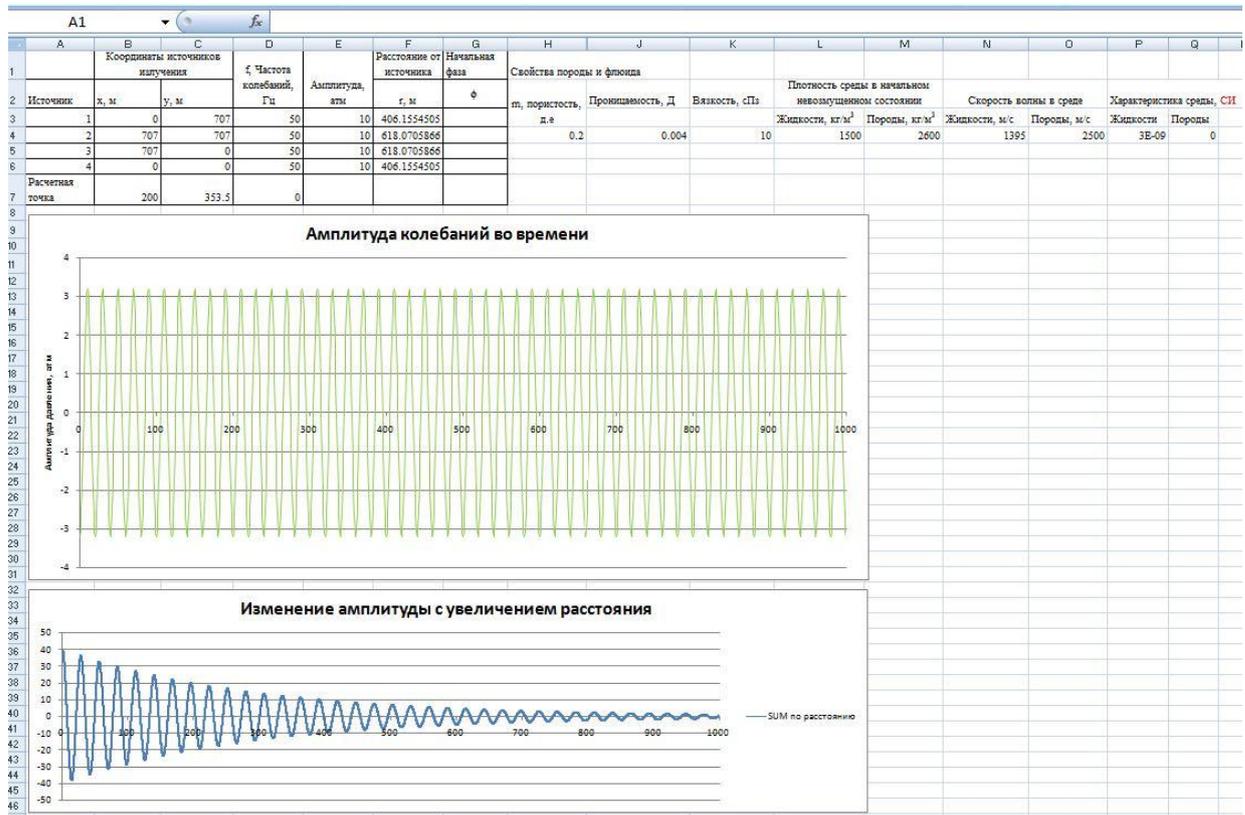


Рисунок 4.8 – Скриншот окна рабочих параметров программы EXCEL

Задавая исходные параметры объекта (пористость, проницаемость, пластовое давление, вязкость насыщающих флюидов) и амплитудно-частотные характеристики скважинных источников (амплитуда давления и частота колебаний) и учитывая размещение этих источников (расстояние между скважинами и расстояние до области воздействия), возможно оценить результирующее поле давлений.

Кроме того, возможно подобрать амплитудно-частотные характеристики таким образом, чтобы создать необходимый градиент давления и привести невыработанные запасы нефти в движение в сторону области пониженного давления – к добывающей скважине.

Данные расчеты легли в основу программы для ЭВМ «Расчет показателей воздействия упругими колебаниями на продуктивный пласт» (свидетельство о гос. регистрации № 2021662139, Приложение А).

Следующим шагом является подбор и моделирование акустического поля на эксплуатационном объекте – нефтяном пласте, характеризующимся высокой степенью вероятности образования целик нефти в межскважинной зоне.

4.3 Методика определения амплитудно-частотных характеристик акустических излучателей для воздействия на область пласта с невыработанными запасами нефти

Опираясь на вышеизложенные формулы распространения колебаний в продуктивном пласте, предлагается использовать их для нахождения оптимальных значений амплитуды и частоты внутрискважинных излучателей упругих колебаний.

Предлагаемая методика заключается в следующем:

1. Путем анализа данных разработки эксплуатационного объекта, карт нефтенасыщенности, результатов гидродинамического моделирования по историческим данным работы скважин подбирается участок пласта с невыработанными запасами нефти, расположенными в некоторой межскважинной области.

2. Определяются координаты центра найденного участка относительно нагнетательных скважин, из которых предполагается осуществлять акустическое воздействие.

3. Анализируются геолого-физические характеристики эксплуатационного объекта и насыщающих флюидов.

4. Характеристики задаются в программу ЭВМ, разработанную на основе вышеизложенных формул распространения акустического поля от нескольких источников в насыщенном продуктивном пласте.

5. Путем перебора амплитудно-частотных характеристик с учетом технических возможностей внутрискважинных излучателей определяется амплитуда, частота и фаза каждого источника колебаний таким образом, чтобы максимальная энергия приходилась на центр участка пласта с невыработанными запасами нефти, а поле с нулевым или околонулевым отклонением давления от текущего пластового было смещено к добывающим скважинами, создавая, тем самым, дополнительный градиент давления в сторону воронки депрессии.

6. Получив поле упругих колебаний, отвечающее искомым требованиям, возможно проверить технологическую эффективность путем гидродинамического моделирования, задавая полученное локальное изменение давления в гидродинамическую модель эксплуатационного объекта.

Применение указанной методики будет рассмотрено далее в работе.

4.4 Выбор, обоснование и описание характеристик эксплуатационного объекта для гидродинамического моделирования

В качестве объекта исследования акустического воздействия на пласт с целью вовлечения в разработку невыработанных запасов нефти предлагается объект АС, описанный в разделе 3.

Проведя анализ истории разработки объекта, был взят для моделирования участок 1, на котором была реализована 5-точечная система разработки.

Особенностью 1 участка является наличие низкопроницаемых интервалов слабо концентрированных в толщине глин. Данный участок вводился в разработку первым. На дату анализа на участке числится 31 пробуренная скважина, из которых 26 добывающих и 15 нагнетательных.

На участке утверждена и сформирована 5-точечная система разработки, плотность сетки скважин 32 га/скв. Участок характеризуется однотипной работой скважин с входными дебитами по нефти 9 т/сут, по жидкости – 15 т/сут в среднем при обводненности 41 %. Наблюдается снижение дебитов скважин в процессе

эксплуатации. На дату анализа дебит по жидкости составляет 8,6 т/сут, по нефти – 3 т/сут при обводненности скважинной продукции – 66 %.

Накопленная добыча нефти составляет 105 тыс. т, на одну скважину приходится в среднем 1,7 тыс. т или 1,4 тыс. т на 1 метр нефтенасыщенной толщины добывающей скважины.

Отдельный анализ работы скважин, которые не были обводнены в результате закачки воды, показал, что их дебит по жидкости в среднем составляет 6,8 т/сут, а по нефти – 3,3 т/сут. Средняя обводненность составляет 51 %. Накопленная добыча нефти по этим скважинам составляет 95,2 тыс. т: 9,5 тыс. т на одну скважину или 1,5 тыс. т на 1 метр вскрытой нефтенасыщенной толщины. Произведением начальных геологических запасов на утвержденный коэффициент извлечения нефти была определена средняя по участку плотность запасов нефти, которая составила 52 тыс. т / 32 га или 7,2 тыс. т. / 32 га / м.

Исходя из анализа, можно заключить, что происходит неравномерная выработка запасов нефти из-за того, что добыча нефти и показатели обводненности по 2 группам скважин (высоко- и низкообводненные) не согласуются.

Нагнетательные скважины характеризуются однотипной работой с устьевым давлением равным 15,2 МПа и начальной приемистостью 84,7 м³/сут, при текущей – 21,3 м³/сут. Снижение приемистости обусловлено низким значением пьезопроводности пласта.

Средневзвешенное по площади пластовое давление равно 229,8 атм. График изменения пластового давления показан на рисунке 4.9.

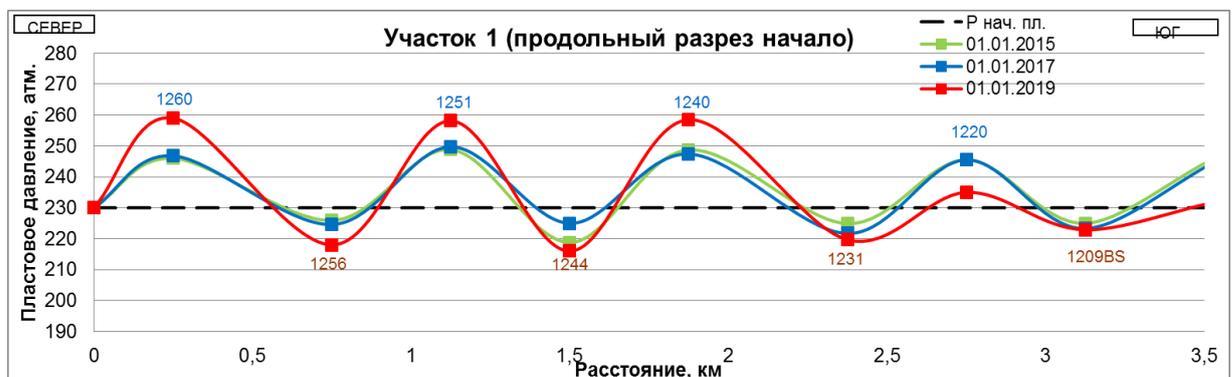


Рисунок 4.9 – Динамика изменения средневзвешенного пластового давления

Таблица 4.1 – Оценка пластового давления по участкам пласта АС

Участок	Пластовое давление, атм			Градиент давления, атм/100м
	среднее	в районе нагнетательных скважин	в районе добывающих скважин	
1 Север	233.9	247.3	220.4	8
2	227.7	235.9	219.4	6
3 (не введен)	-	-	-	-
4	230.3	241	219.6	8
5	228.6	238.1	219.1	8
В целом	229.8	240.2	219.4	8

Эпюры пластовых давлений вдоль и поперек участка приведены на рисунках 4.10-4.11.



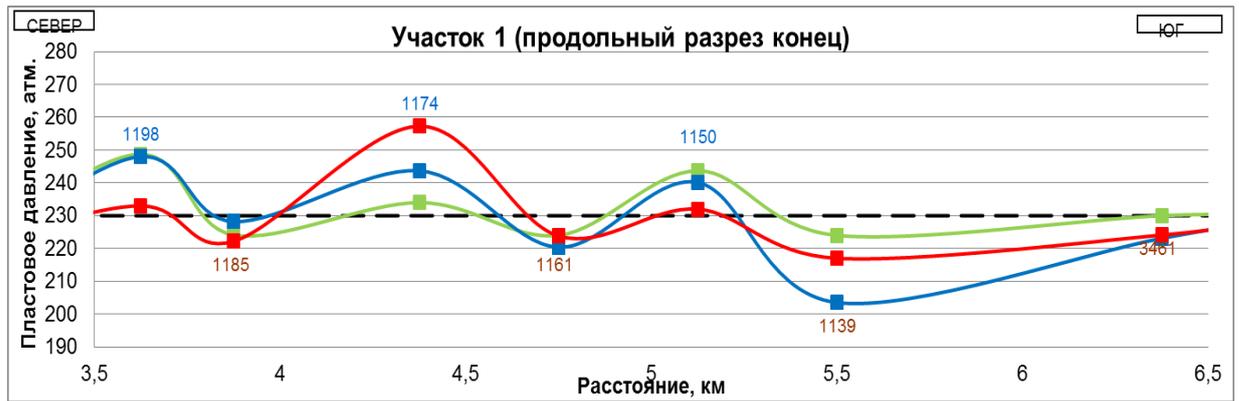


Рисунок 4.10 – Эпюры пластового давления пласта АС (продольный разрез)

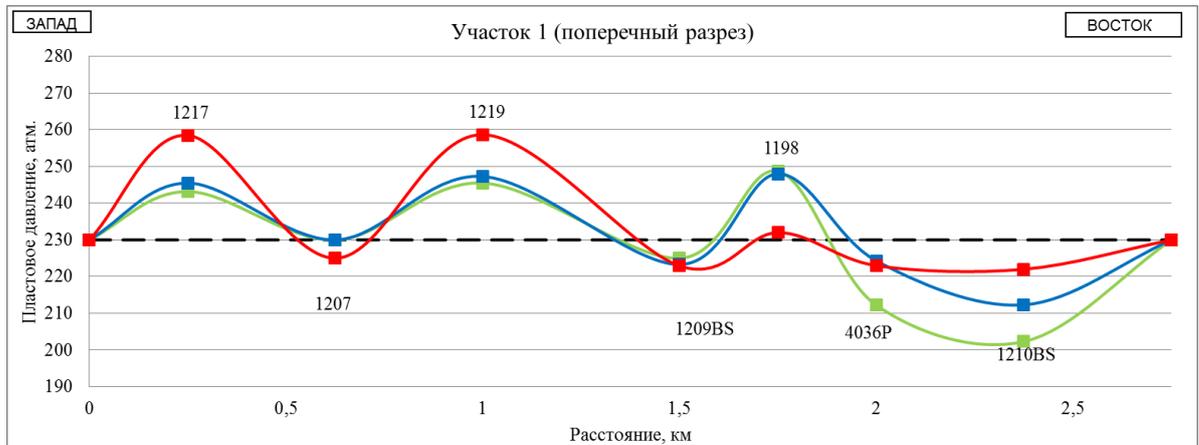


Рисунок 4.11 – Эпюры пластового давления пласта АС (поперечный разрез)

После анализа карты текущей нефтенасыщенности объекта АС, была выбрана и смоделирована область пласта (рисунок 4.12) для дальнейшего гидродинамического расчета.

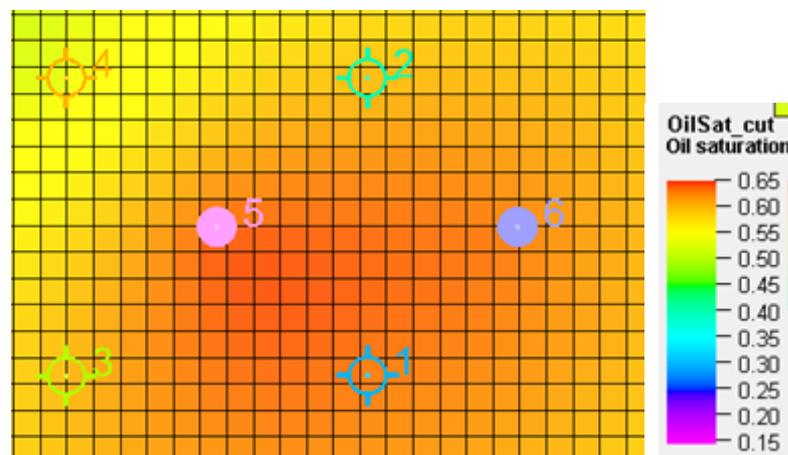


Рисунок 4.12 – Нефтенасыщенность участка пласта АС

4.5 Определение характеристик акустического поля

Для оценки возможности применения акустического воздействия на область, неохваченную процессом воздействия были смоделированы различные поля акустического поля с использованием разработанной математической модели.

На рисунках 4.13 – 4.15 представлены различные конфигурации амплитудно-частотных характеристик внутрискважинных источников воздействия.

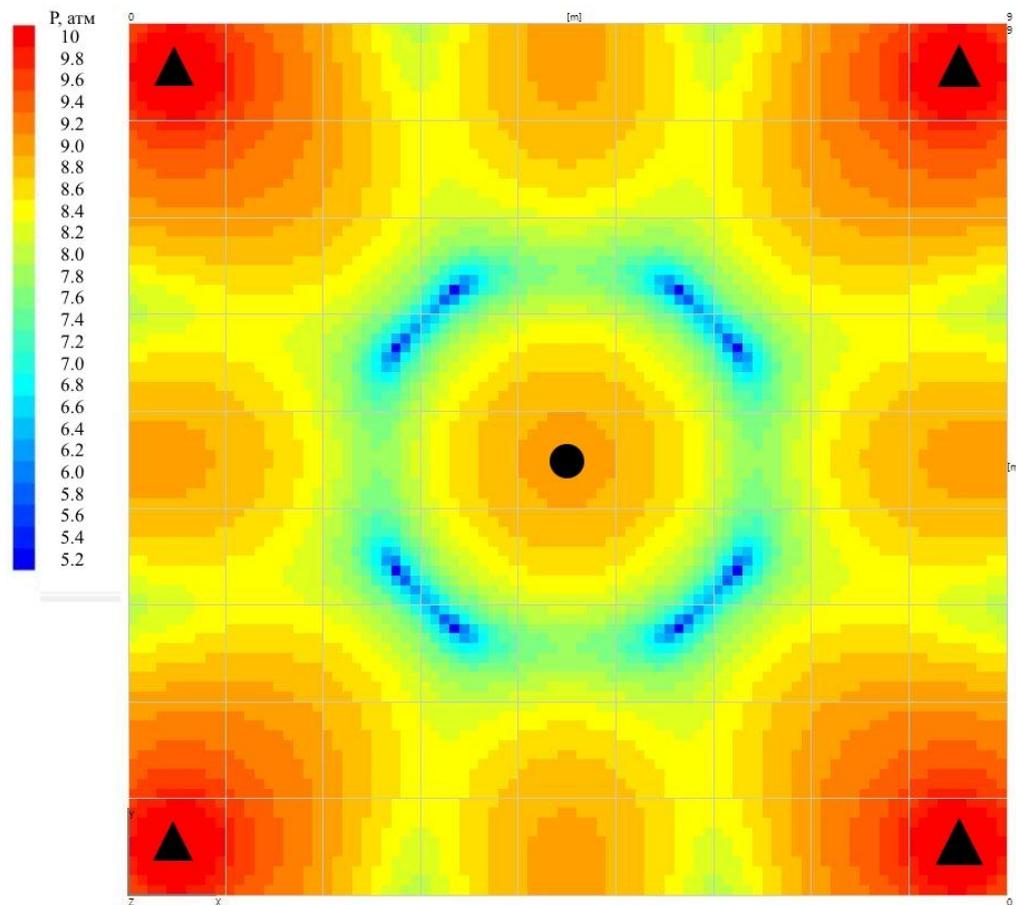


Рисунок 4.13 – Акустическое поле. Амплитуда 10 атм, частота источников 22,1 Гц

На рисунках показана расстановка нагнетательных (треугольник) и добывающих (кружок) скважин. Однако эти карты наложения акустических волн не учитывают пластовое давление. Наложение интерференционного поля на карту изобар является следующим шагом.

Анализируя полученные интерференционные картины распространения колебаний в пласте, для использования в гидродинамической модели был выбран 1 вариант, отличающийся частотой воздействия равной 22,1 Гц и амплитудой давления источников, составляющей до 10 атм.

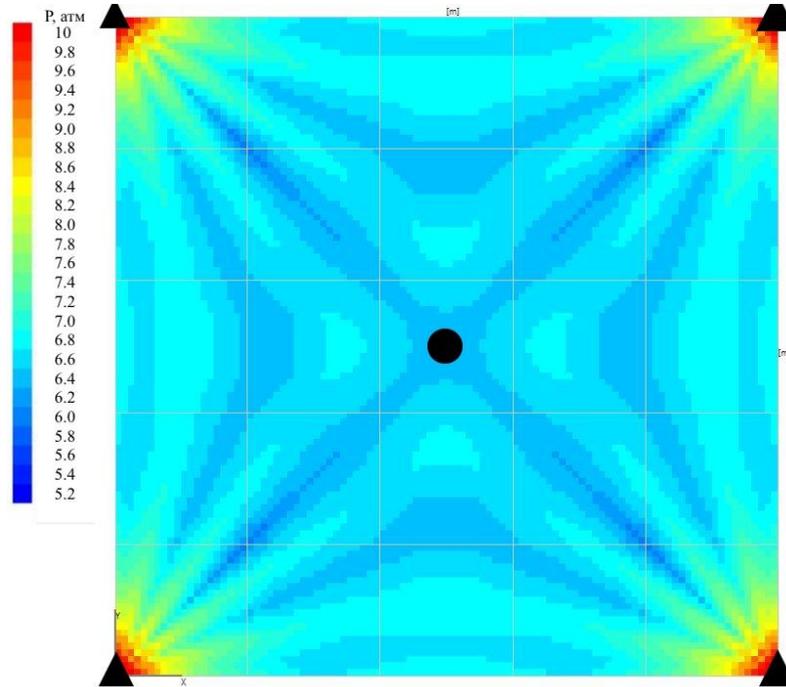


Рисунок 4.14 – Акустическое поле. Амплитуда 10 атм, частота источников 35,0 Гц

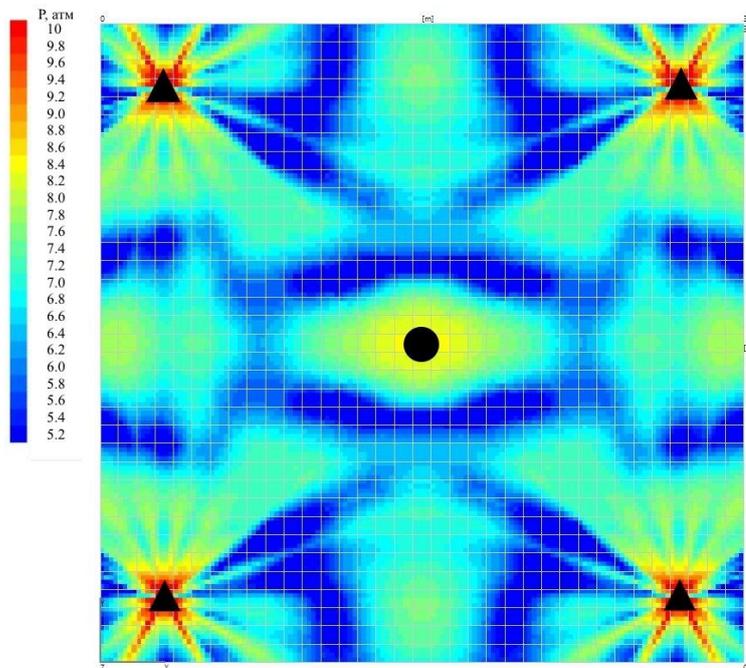


Рисунок 4.15 – Акустическое поле. Амплитуда 10 атм, частота источников 100 Гц

С ростом частоты колебаний источников наблюдается заметное ослабление акустического поля в пласте. Области усиления колебательного поля становятся менее выраженными, а, значит, градиент давления в этих областях будет не столь значителен относительно первого варианта.

Таким образом, опираясь на визуальную картину распределения акустической энергии в пласте, были выбраны следующие характеристики внутрискважинных источников (рисунок 4.13): амплитуда 10 атм, частота источников 22,1 Гц.

4.6 Моделирование результатов акустического воздействия на область пласта АС с целью повышения нефтеотдачи

Учитывая распределения колебательного поля (рисунок 4.13), производилось гидродинамическое моделирование.

Для оценки эффективности акустического воздействия было сопоставлено два варианта расчета модели:

1 вариант – разработка без применения акустического воздействия по реализованной системе.

2 вариант – разработка с учетом акустического воздействия.

На рисунке 4.16 представлены карты нефтенасыщенности месторождения на 01.01.2030 г. без воздействия и с учетом акустического воздействия.

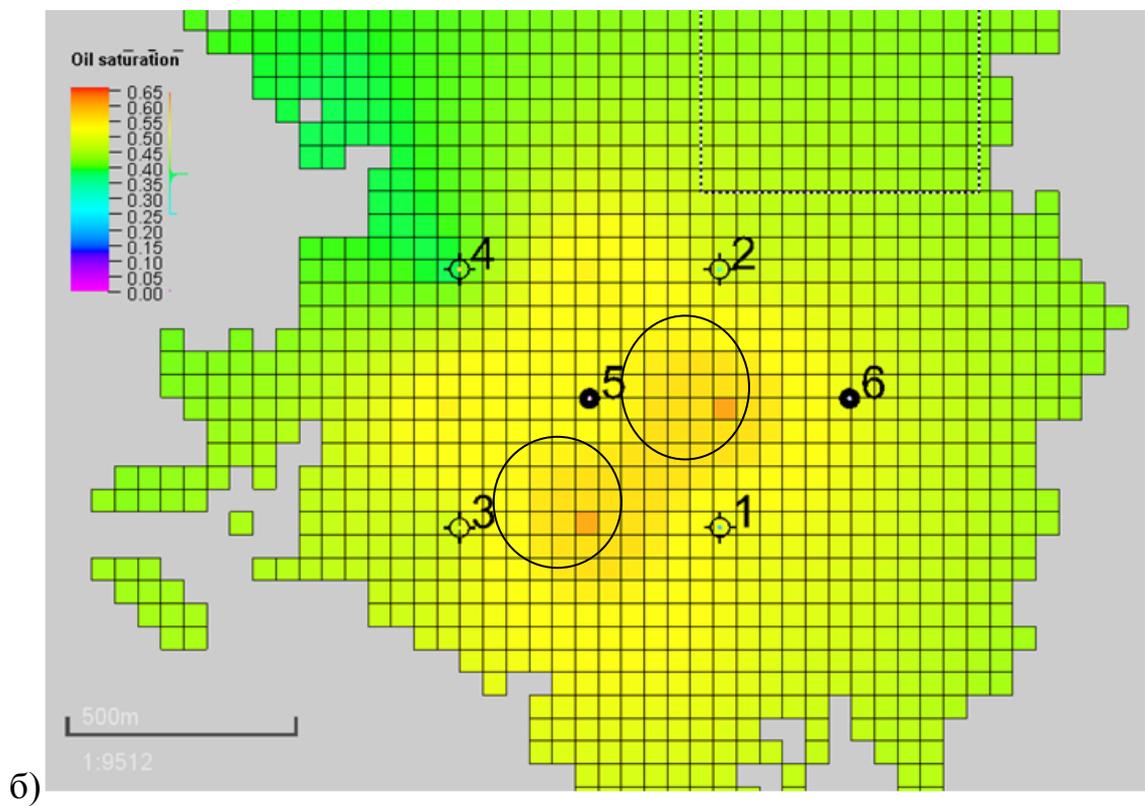
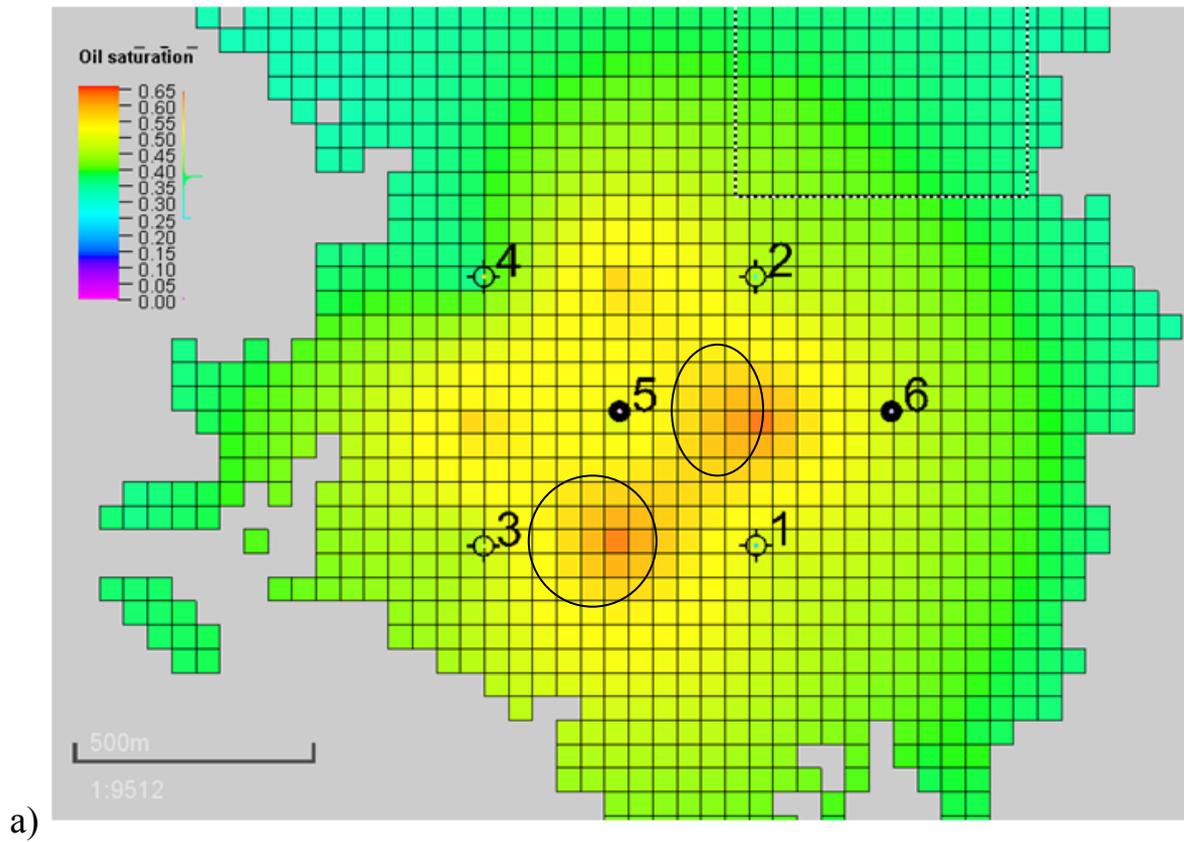


Рисунок 4.16 – Карты нефтенасыщенности модели участка объекта АС: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии

На рисунке 4.17 представлен разрез куба нефтенасыщенности по линии скважин 2-1: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии.

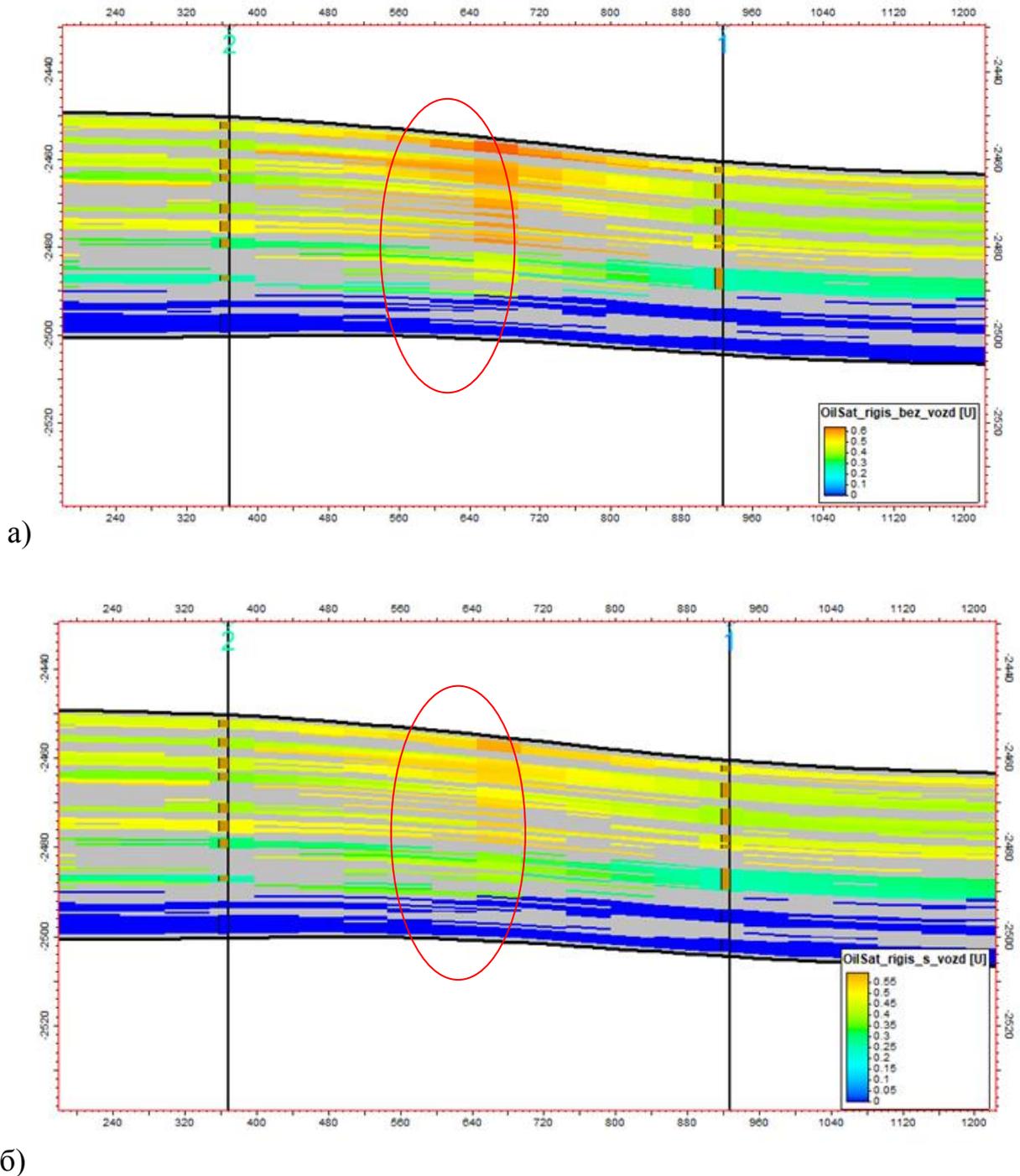


Рисунок 4.17 – Карты нефтенасыщенности модели участка объекта АС по линии скважин 2 – 1: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии.

На рисунке 4.18 представлен разрез куба нефтенасыщенности по линии скважин 3 – 1: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии.

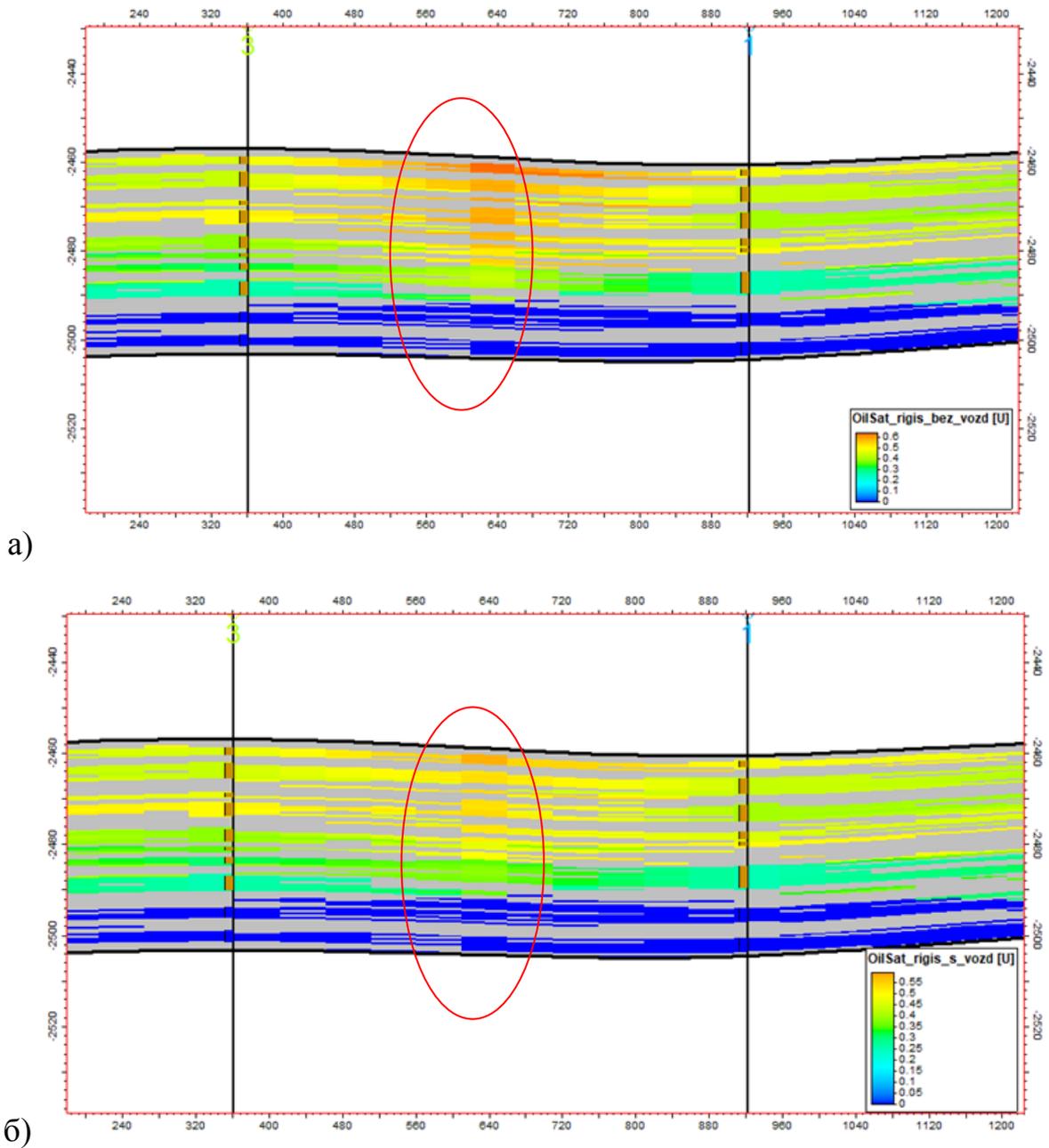


Рисунок 4.18 – Карты нефтенасыщенности модели участка объекта АС по линии скважин 3 – 1: а) без воздействия; б) при акустическом воздействии.

По обоим разрезам в межскважинной зоне прослеживается заметное снижение нефтенасыщенности при моделировании с учетом акустического воздействия. В этих областях эффект оказался максимальным.

В целом куб нефтенасыщенности на 01.01.2030 г, полученный по 2 варианту (при акустическом воздействии), характеризуется более полной выработкой запасов нефти в межскважинной зоне объекта.

Эффективность акустического воздействия определялась путем сопоставления добытого количества нефти на конец прогнозного периода. Прогнозный период составил 10 лет (до 2030 года).

В области между нагнетательными скважинами №3 и №1, а также №2 и №1 в 1 варианте наблюдается наличие невыработанной области, количество запасов которой на 01.01.2030 г оценивается в 6,835 тыс.т.

Проведенный анализ работы добывающих скважин в районе моделирования акустического воздействия (№№ 5, 6) показал, что дебиты скважин по нефти в варианте 2 превышали дебиты скважин в 1 расчетном варианте, начиная с 2020 года и до конца прогнозного периода – до 2030 года (рисунок 4.19 – 4.22).

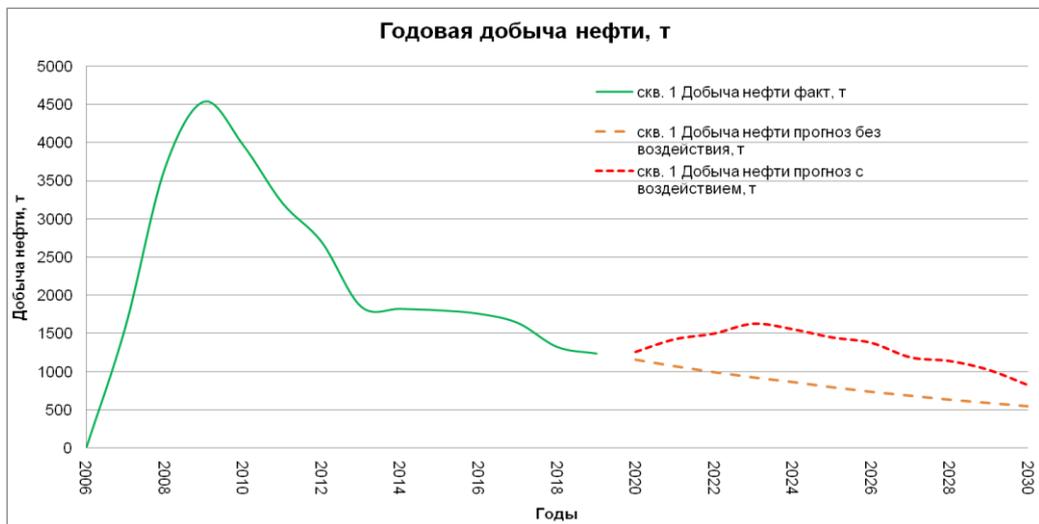


Рисунок 4.19 – Добыча нефти скважины №5

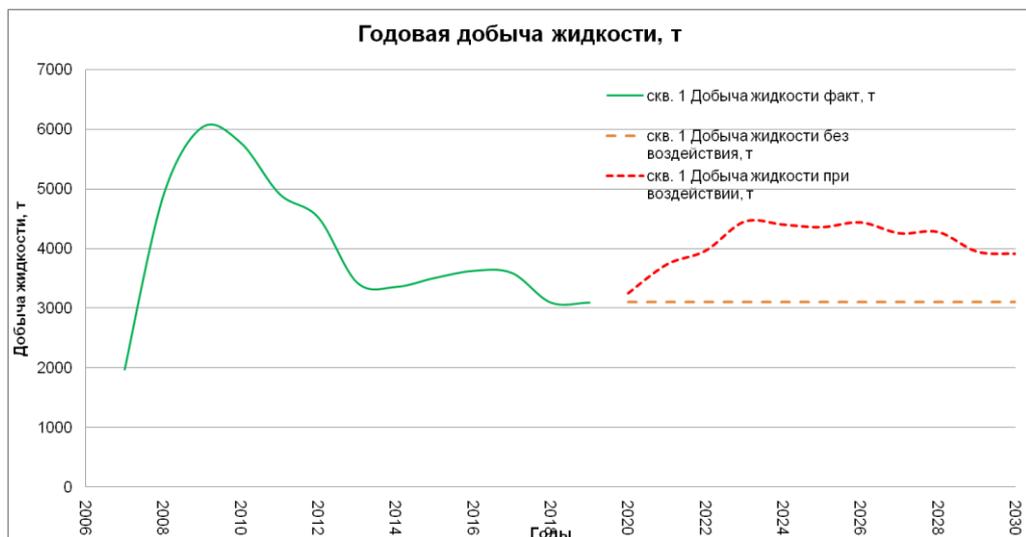


Рисунок 4.20 – Добыча жидкости скважины №5

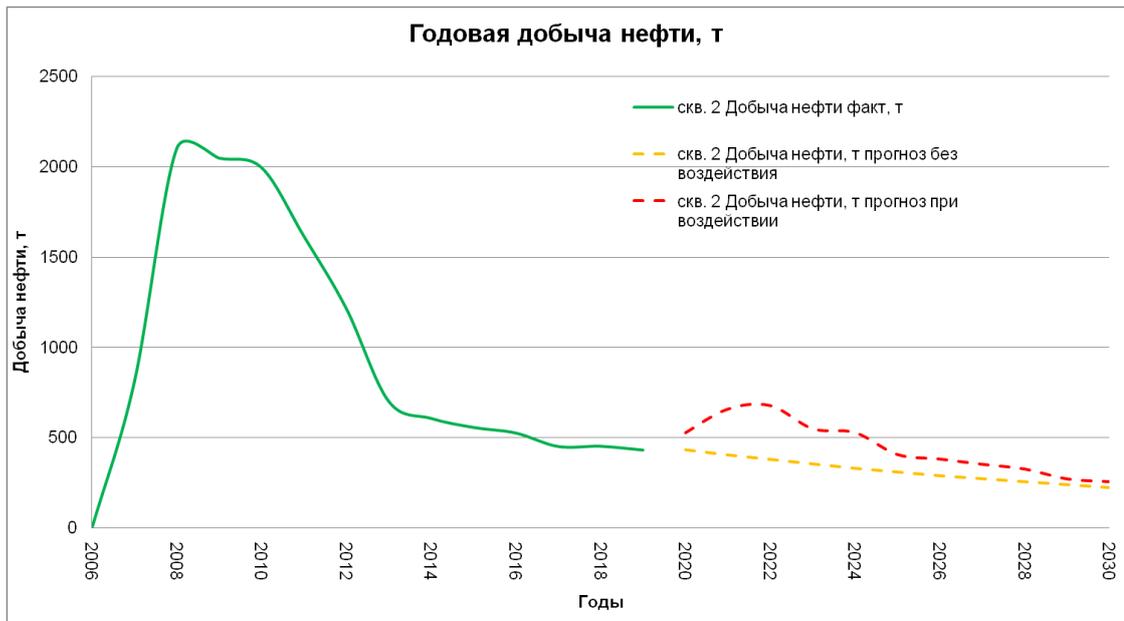


Рисунок 4.21 – Добыча нефти скважины №6

Можно оценить эффективность, полученную от акустического воздействия по рассматриваемой методике, в количестве 6,835 тыс. т дополнительно добытой нефти, 5,402 т из которых приходится на скважину № 5 и 1,433 т на скважину № 6.

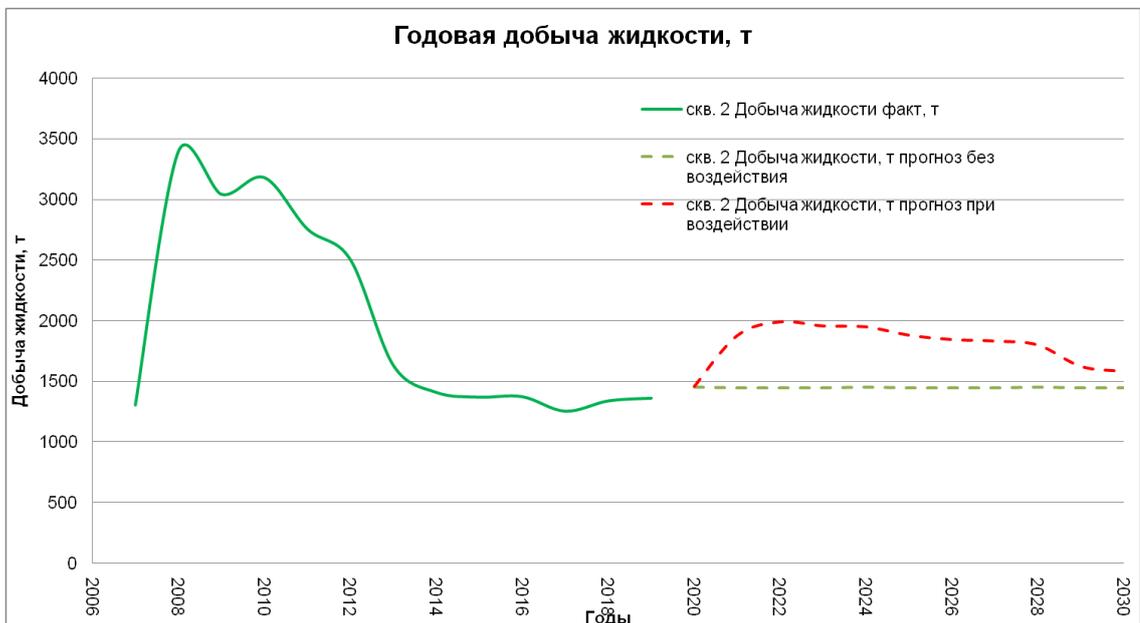


Рисунок 4.22 – Добыча жидкости скважины №6

Полученные данные свидетельствуют о том, что акустическое воздействие по предложенной методике способно влиять на распределение фильтрационных потоков в межскважинной зоне. Данный эффект обоснован на гидродинамической модели объекта, разрабатываемого по 5-точечной системе.

Предлагаемый метод определения распределения акустической энергии в пласте может быть применен и к другим эксплуатационным объектам. Учитывая геолого-физические характеристики коллекторов, с их помощью можно определять распределение акустического поля в пласте, подбирая лучшие характеристики внутрискважинных источников для воздействия на конкретные зоны.

Предлагаемая методика рекомендуется к промышленной апробации технологий акустического воздействия и, в случае успешности испытаний, может служить эффективным инструментом для анализа эффективности и применимости той или иной технологии колебательного воздействия на продуктивные пласты.

Используемая в предлагаемой методике программа для ЭВМ была внедрена на предприятие путем использования результатов расчетов при обосновании эффективности планируемых методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации притока в проектном документе (Приложение Б.2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа теоретической информации, результатов лабораторных и промысловых исследований в области воздействия на нефтяные пласты упругими колебаниями классифицированы технологии акустического воздействия относительно способа генерации акустической волны и наблюдаемых эффектов.

2. Воздействие акустическими негармоническими колебаниями приводит к снижению критического градиента давления начала фильтрации до 15 %. Установлена обратно-пропорциональная зависимость снижения критического градиента давления начала фильтрации от абсолютной проницаемости исследованных образцов керна.

3. Доказано повышение коэффициента подвижности в среднем на 6 % для образцов керна с высокой абсолютной проницаемостью и на 19 % для образцов керна с низкой проницаемостью при воздействии акустическими негармоническими колебаниями.

4. Доказано повышение коэффициента вытеснения нефти водой на 9% при воздействии акустическими негармоническими колебаниями.

5. Усовершенствована технология акустического воздействия на пласт с целью интенсификации притока нефти, отличающаяся от известных использованием негармонических колебаний и возможностью одновременной акустической обработки и эксплуатации скважины.

6. Разработана методика определения оптимальных амплитудно-частотных характеристик акустических излучателей для воздействия на межскважинную зону пласта с невыработанными запасами нефти, учитывающая распространение и взаимное наложение быстрых и медленных волн упругих колебаний от нескольких источников, которая может быть использована при проектировании волновых методов увеличения нефтеотдачи на эксплуатационных объектах с остаточными запасами.

Авторская методика позволила определить амплитудно-частотные характеристики внутрискважинных излучателей акустических колебаний, создающих воздействие, направленное на межскважинную зону пласта, разрабатываемого по 5-точечной системе. По результатам гидродинамического моделирования технологическая эффективность такого воздействия составила 6835 тонн дополнительно добытой нефти.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АВ – акустическое воздействие;
- АСПО – асфальтосмолопарафиновые отложения;
- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
- ВСВ – вибросейсмическое воздействие;
- ГИС – геофизические исследования скважин;
- ГТМ – геолого-техническое мероприятие;
- КИН – коэффициент извлечения нефти;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- КРС – капитальный ремонт скважин;
- НГКМ – нефтегазоконденсатное месторождение;
- НИЗ – начальные извлекаемые запасы;
- ПНД – полиэтилен низкого давления;
- ТИЗ – текущие извлекаемые запасы;
- МСЗ – межскважинная зона;
- НКТ – насосно-компрессорная труба;
- ПЗП – призабойная зона пласта;
- ПЗС – призабойная зона скважины;
- ПИВ – плазменно-импульсное воздействие;
- УВ – углеводороды;
- ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства;
- ШГН – штанговый глубинный насос;
- ЭК – эксплуатационная колонна;
- ЭЦН – электроцентробежный насос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыбленко, В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. / В.П. Дыбленко. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2008. – 80с.
2. Способ очистки призабойной зоны пласта и установка для его осуществления: пат. 2396420 РФ: МПК Е 21 В 37/00 / Абрамов О.В., Абрамов В.О., Печков А.А., Муллакаев М.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Виатех". – №2009102159/03; заявл. 23.01.2009; опубл.10.08.2010, Бюл. № 22.
3. Способ добычи нефти с использованием энергии упругих колебаний и установка для его осуществления: пат. 2392422 РФ: МПК Е 21 В 43/16 / Абрамова А.В., Баязитов В.М., Печков А.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "СоНовита". – №2009115817/03; заявл. 28.04.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.
4. Прачкин, В.Г. Повышение продуктивности скважин методом акустического воздействия на высоковязкие нефти в каналах призабойной зоны скважины / В.Г. Прачкин, М.С. Муллакаев, Д.Ф. Асылбаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – №9. – С. 15-19.
5. Муллакаев, М.С. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти / М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов, В.М. Баязитов и др. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2011. – №5. – С. 24-27.
6. Апасов, Г.Т. Промысловые и стендовые испытания по оценке эффективности ультразвукового воздействия на пласт / Г.Т. Апасов, Т.К. Апасов, Р.Т. Апасов, В.Г. Мухаметшин и др. // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна. Опыт, инновации: Сб. науч.-техн. конф. г. Тюмень. – 2012. – С. 92-102.

7. Музипов, Х.Н. Интенсификация притоков нефти с помощью звуковых волн : дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / Музипов Халим Назипович. – Тюмень, 2005. – 125 с.
8. Хмелев, В.Н. Ультразвуковой гидроакустический комплекс для повышения дебита нефтяных скважин [Электронный ресурс] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, С.С. Хмелев // Новосибирск, НГТУ. – 2007. Режим доступа: [u-sonic.ru>downloads/edm07/tube_rus.pdf](http://u-sonic.ru/downloads/edm07/tube_rus.pdf).
9. Максимов, Г.А. Роль нагрева при акустическом воздействии на пласт / Г.А. Максимов, А.В. Радченко // Геофизика. – 2001. – №6. – С. 38-46.
10. Неволин, В.Г. Опыт применения звукового воздействия в практике нефтедобычи Пермского края / В.Г. Неволин. – Пермь. – 2008. – 54 с.
11. Кныш, Ю.А. О механизме неустойчивости течения закрученных потоков жидкости и газа в элементах ГТД / Ю.А. Кныш, С.В. Лукачев // Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей : тр. / КуАИ. – Куйбышев, 1974. – Вып.67. – С.205-208.
12. Кныш, Ю.А. Экспериментальное исследование вихревого генератора звука / Кныш Ю.А., С.В. Лукачев // Акустический журнал. – 1977. – Т.33, вып.5. – С.776-782.
13. Белоусов, А.Н. Акустические свойства вихревых пневматических форсунок / А.Н. Белоусов, Ю.А. Кныш, С.В. Лукачев // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1977. – №1. – С. 17-22.
14. Кныш, Ю.А. Способ разделения потоков акустической энергией и отработанного воздуха в вихревом излучателе звука / Ю.А. Кныш, С.В. Лукачев // Акустический журнал. – 1980. – Т. 24, № 2. – С. 299-302.
15. Неволин, В.Г. Закачка воды с применением акустического воздействия / В.Г. Неволин, О.В. Поздеев // Вопросы освоения нефтяных залежей Пермского Приуралья в усложнённых условиях: Сб. научн. тр. / ПермНИПИнефть. – 1990. – С. 13 – 17.
16. Алескеров, В.Ф. Результаты промыслового эксперимента по акустическому воздействию на пласт / В.Ф. Алескеров В.Г. Неволин // ЭИ.

Техника и технология добычи нефти и обустройство месторождений. – 1991. – Вып. 3. – С. 1-5.

17. Неволин, В.Г. Акустическое воздействие в технологических процессах при добыче нефти / В.Г. Неволин, О.В. Поздеев. – Пермь: ПермНИПИнефть, 1991. – 80 с.

18. Антоненко, Н.М. Гидроимпульсный насос как средство вибровоздействия на призабойную зону пласта / Н.М. Антоненко // Нефтепромысловая геология и строительство скважин в Прикаспийском районе. – М., 1986. – С. 177-181.

19. Антоненко, Н.М. Воздействие на призабойную зону пласта гидроимпульсным насосом / Н.М. Антоненко // ЭИ. Нефтепромысловое дело (отечественный опыт). – 1986. – №2. – С. 21-24.

20. Марфин, Е.А. Промысловые испытания волнового воздействия на процесс добычи нефти на Первомайском месторождении / Е.А. Марфин, Я.И. Кравцов, А.А. Абдрашитов и др. // Scientific and technical journal. Georesources. – 2014. – №2. – С.14-16.

21. Умняев, В.Г. Результаты акустического воздействия на пласты нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции / В.Г. Умняев, А.В. Скобелев, Г.П. Зимин, В.А. Зыков // НТВ «Каротажник». – 2009. – Вып.1 (178). – С. 60-72.

22. Умняев, В.Г. Анализ эффективности проведения акустического воздействия на нефтегазоконденсатных месторождениях Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. // НТВ «Каротажник». – 2012. – Вып. 10 (220). – С. 63-73.

23. Кузнецов, О.Л. Физические основы вибрационного и акустического воздействий на нефтегазовые пласты / О.Л. Кузнецов, Э.М. Симкин, Дж. Чилингар. – М.: Мир, 2001. – 260 с.

24. Кузнецов, О.Л., Применение ультразвука в нефтяной промышленности / О.Л. Кузнецов, С.Ф. Ефимова. – М.: Недра, 1983. – 192 с.

25. Сургучев, М.Л., Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействия на нефтяные пласты / М.Л. Сургучев, О.Л. Кузнецов, Э.М. Симкин. – М.: Недра, 1975. – 320 с.

26. Воронова, Е.В. Результаты применения виброударных и вибросейсмических технологий повышения нефтеотдачи на месторождениях Урало-Поволжья [Электронный ресурс] / Е. В. Воронова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2006. – № 2. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Voronova/Voronova_2.pdf.

27. Бажалук, Я.М. Оцінка ефективності імпульсно-хвильових дій на процеси нафтовитискання у пласті / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, Я.Д. Климишин, О.І. Гутак, М.В. Худін, В.Я. Бажалук, В.Д. Михайлюк // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 2. – С. 5-10.

28. Свалов, А.М. О механизме волнового воздействия на продуктивные пласты. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений / А.М. Свалов // Нефтяное хозяйство. – 1996. – №7. – С. 27-29.

29. Свалов, А.М. Научно-методическое обоснование технологий ударно-волнового воздействия на продуктивные пласты / А.М. Свалов // Нефтяное хозяйство. – 1999. – №11. – С. 26.

30. Свалов, А.М. Особенности возбуждения автоколебательных процессов при разработке нефтегазовых залежей / А.М. Свалов, А.Я. Хавкин // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1998. – №2 – С. 36.

31. Симонов, Б.Ф. Результаты опытно-промысловых работ по повышению нефтеотдачи ввибросейсмическим методом / Б.Ф. Симонов, С.В. Сердюков, Е.И. Чередников и др. // Нефтяное хозяйство. – 1996. – №5. – С. 48-55.

32. Персиянцев, М.Н. Результаты промышленного внедрения вибросейсмического воздействия на месторождениях АО "Оренбургнефть" / М.Н. Персиянцев, В.А. Калашников, Ф.И. Алиев, С.А. Кириллов // Нефтяное хозяйство. 1996. – №10. – С. 37–38.

33. Бажалук, Я.М. Увеличение отбора нефти путем воздействия на увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, Я.Д. Клымышин и др. // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3. – С. 185-198.

34. Лукьянов, Ю.В. Роль методов увеличения нефтеотдачи в добыче нефти на месторождениях. ОАО «АНК «Башнефть» / Ю.В. Лукьянов и др. // Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов : материалы 2-го междунар. науч. симпозиума. – 2009. – С. 77-82.

35. Черемисин, А.Н. Воздействие акустического поля на фильтрацию двухфазной жидкости в пористом коллекторе : дисс. ... канд. техн. наук : 01.02.05 / Черемисин Александр Николаевич. – Тюмень, 2009. – 168 с.

36. Черемисин, Н.А., Роль неупругой деформации коллекторов в нефтеотдаче пластов / Н.А. Черемисин, В.П. Сонич, П.А. Ефимов // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 9.

37. Кабельный инфразвуковой гидровибратор: пат. 2514287 РФ: МПК Е 21 В 28/00, Е 21 В 43/25 / Родионов С.О., Кивокурцев А.Ю.; заявитель и патентообладатель Родионов Сергей Олегович. – №2012145352/03; заявл. 25.10.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12.

38. Яковлев, А.Л. Технические средства для обработок скважин с использованием виброволнового воздействия. Скважинные генераторы колебаний / А. Л. Яковлев, Ю. А. Шамара, Е. А. Даценко // НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИИ (ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК). – 2016. – №1. – С. 139-148.

39. Попов, А.А. Ударное воздействие на призабойную зону скважин / А. А. Попов. – М. : Недра, 1990. – 157 с.

40. Торшин, В.В. Физические процессы в жидкости под воздействием электрического разряда / В.В. Торшин, Ф.Ф. Пашенко, Б.Н. Бусыгин. – М.: Издательство Карпов Е.В., 2005. – 122 с.

41. Максютин, А.В. Комплексная технология плазменно-импульсного и физико-химического воздействия на продуктивный пласт для интенсификации добычи нефти на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами: дисс. ... канд.

техн. наук: 25.00.17 / Максютин Александр Валерьевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 153 с.

42. Гулый, Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий / Г.А. Гулый. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.

43. Максутов, Р.А. Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону / Р.А. Максутов, О.Н. Сизоненко, П.П. Малюшевский и др. // Нефтяное хозяйство. – М.: Недра, 1985. – № 1. – С. 34-35.

44. Валиуллин, А.В. Виброобработка призабойной зоны пласта: Нефтяник / А.В. Вилиуллин – М.: Недра, 1975. – № 2. – 12 с.

45. Ганиев, Р.Ф. Колебания твердых тел / Р.Ф. Ганиев, В.О. Кононенко. - М.: Наука, 1976. - 432 с.

46. Ганиев, Р.Ф. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий: изд. 2-е, дополн. / Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. – М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика». – 2011. – 780 с.

47. Ганиев, О.Р. Увеличение фильтрационной способности призабойной зоны пласта с помощью волнового воздействия для интенсификации добычи нефти / О. Р. Ганиев, Р. Ф. Ганиев, Г. Н. Гранова и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – №5. – С. 88-93.

48. Саегараев, Р.Х. Интенсификация добычи высоковязких нефтей из порово-трещинных коллекторов с использованием эффектов нелинейной волновой механики : дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Саегараев Рустем Халитович. – Тюмень, 2015. – 227 с.

49. Шамов, Н.А. Теоретические исследования динамики частиц выбуренной породы при наложении волнового поля [Электронный ресурс] / Н. А. Шамов, О. С. Кузнецов, Р. Х. Саегараев. // Бурение и нефть. – 2013. – №7. – Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2013-07-08/4>.

50. Шамов, Н. А. Технология депрессионно-волновой очистки прискважинной зоны пласта через колонну НКТ [Электронный ресурс] /

Н. А. Шамов, О. С. Кузнецов, Р. Х. Саегараев. // Бурение и нефть. – 2013. – №7. – Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2013-07-08/5>.

51. Кучумов, Р. Я. Применение метода вибровоздействия в нефтедобыче / Р. Я. Кучумов. – Уфа: Башкнигиздат, 1988. – 111 с.

52. Кучумов, Р.Я. Экспериментальная установка для исследования воздействия виброударных волн на проницаемость искусственного керна / Р. Я. Кучумов, Р. А. Кандратов, Н. Х. Нургалеев // Тр.ин-та: УНИ. – 1972. – Вып.8. – С. 118-121.

53. Кучумов, Р. Я. Исследование влияния виброударных волн на проницаемость искусственного керна / Р. Я. Кучумов, Р. Г. Шагиев // Тр. ин-та: УНИ. – 1974. – Вып.17. – С. 44-46.

54. Кучумов, Р. Я. Исследование механизма процесса вибровоздействия на пористую среду / Р. Я. Кучумов // ВНИИнефтеотдача. – Уфа. – 1989. – №1733.

55. Hamidia, H. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results / H. Hamidia, A. Haddad, Pilcher W. and others // Ultrasonics. – 2021. – V.110.

56. Razavifar, M. Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltenic crude oil / M. Razavifar, J. Qajar // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2020. – V.153.

57. Дыбленко, В. П. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В. П. Дыбленко, Р. Н. Камалов, Р. Я. Шариффулин, И. А. Туфанов. – 2000. – 358 с.

58. Дыбленко, В.П. Временная инструкция по технологии освоения, повышения продуктивности, реанимации скважин с использованием комплексного виброволнового и депрессионно-химического воздействия / В. П. Дыбленко, И. А. Туфанов, Р. Я. Шариффулин. Казань: ООО «Ойл-Инжиниринг». – 1998. – 46 с.

59. Губайдуллин, А. А. Экспериментальное исследование вибро-акустического воздействия на фильтрацию углеводородных систем в пористых средах / А. А. Губайдуллин, С. А. Конев, С. Н. Саранчин // Нефть и газ Западной

Сибири: Материалы всероссийской научно-технической конференции. Т.1. – Тюмень, 2009. – С. 70-72.

60. Губайдуллин, А. А. Волновые воздействия при вытеснении углеводородов в пористых средах / А. А. Губайдуллин // Проблемы и достижения прикладной математики и механики: сб. науч. тр. к 70-летию ак. В.М. Фомина. – Новосибирск: Нонпарель. – 2010. – С. 35-49.

61. Губайдуллин, А. А. Экспериментальное исследование вибрационно-акустического воздействия на вытеснение остаточных углеводородов в пористой среде / А. А. Губайдуллин, С. А. Конев, С. Н. Саранчин // Тез. докл. Росс. Конф. «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», посвященной 70-летию ак. Р.И. Нигматулина. – Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело. – 2010. – С. 95-96.

62. Марфин, Е. А. Распространение упругих колебаний из скважины в пласт : магист. дисс.: 03.04.03 / Марфин Е.А. – Казань, 2017. – 54 с.

63. Марфин, Е. А. Выбор оптимальных геометрических параметров излучателя на основе резонатора Гельмгольца / Е. А. Марфин, Я. И. Кравцов // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – №6. – С. 101-106.

64. Марфин, Е. А. Экспериментальный стенд для исследования механизма влияния упругих колебаний на вязкость нефти / Е. А. Марфин, Я. И. Кравцов // Труды Академэнерго. – 2011. – №3. – С. 95–101.

65. Кузнецов, О. Л. Возникновение конвективной теплопередачи под действием звукового поля в насыщенных песках / О. Л. Кузнецов, Л. А. Сергеев, Э. М. Симкин // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1968. – №3. – С. 150-152.

66. Вахитов, Г. Термодинамика призабойной зоны нефтяного пласта / Г. Вахитов, О.Л. Кузнецов, Э.М. Симкин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

67. Симкин, Э. М. Экспериментальное исследование теплопроводности насыщенных сред при воздействии акустическим полем различной интенсивности / Э. М. Симкин, О. Л. Кузнецов, Е. Е. Филатова // ИФЖ. – 1973.– №4. – С. 639-642.

68. Закиров, С. Н. Влияние акустического поля низкой частоты на капиллярную пропитку газонасыщенных пористых сред / С. Н. Закиров, А. Н. Шандрыгин, В. Н. Белоненко, П. Э. Аллакулов // Инж.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 2. – С. 232-236.

69. Keshavarzi, B. Application of ultrasound wave for stimulation of asphaltene damaged reservoir rocks: An experimental study. / B. Keshavarzi, M.H. Ghazanfari, and C. Ghotbi // Scientia Iranica. – 2018. – 25, N6. – P.3391-3400.

70. 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. – 4. – V.5. – P.304-314.

71. Vedmenskii, A.M. The acoustic oscillation effect on the saturated pore-medium filtration characteristics with the purpose of oil recovery improvement and intensification of the flow / A.M. Vedmenskii, A.V. Strekalov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 378 (2019) 012105. – 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/337237055_The_acoustic_oscillation_effect_on_the_saturated_pore-medium_filtration_characteristics_with_the_purpose_of_oil_recovery_improvement_and_intensification_of_the_flow.

72. Ведменский, А. М. Воздействие на нефтесодержащий пласт физическими полями с целью увеличения нефтеотдачи / А. М. Ведменский, А. А. Барышников, Н. М. Паклинов [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – №2. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22167>.

73. Ведменский, А. М. Результаты лабораторных исследований процесса воздействия на нефтяной пласт физическими полями / А. М. Ведменский, А. А. Барышников, Н. М. Паклинов, А. В. Стрекалов // Естественные и технические науки. – М.: "Спутник +". – 2018. – №5. – С.82-83.

74. Paklinov, N. M. The research of electro hydroshock and the feasibility of application in the oil wells / N. M. Paklinov, A. M. Vedmenskii, E. S. Kostina,

A. A. Baryshnikov, A. V. Strekalov // 6th Scientific Conference EAGE – Tyumen. – 2019.

75. Кропотова Е. П. Повышение достоверности интерпретации материалов ГИС в тонкослоистом коллекторе на примере пласта АС Западно-Чигоринского месторождения / Е. П. Кропотова, И. В. Федорцов, Т. А. Коровина и др. // Пятая научно-практическая конференция «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Х-М.): сб. науч. тр. – 2001. – С. 34-36.

76. Vedmenskii, A. M. Research work on the possibility of extracting remaining oil reserves by acoustic stimulation of pay layer / A. M. Vedmenskii, A. V. Strekalov, A. A. Baryshnikov, N. M. Gerasimov // 6th Scientific Conference EAGE. – Tyumen. – 2019.

77. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие для вузов : в 5 кн. / И. В. Савельев. – М. : Астрель: АСТ. – Кн. 4 : Волны. Оптика. – 2006. – 256 с.

78. Андреев, А. Д. Физика. Волны : учебное пособие / А. Д. Андреев, С. Н. Колгатин, Л. М. Черных. – СПб: СПбГУТ, 2015. – 40 с.

79. Саворенский, И. Ф. Сейсмические волны / И. Ф. Саворенский. – М.: Недра, 1972. - 270 с.

80. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1974. – 290 с.

81. Рогоцкий, Г. В. Теоретическое и экспериментальное обоснование новых технологий инициирования продуктивных пластов нефтегазоконденсатных месторождений / Г. В. Рогоцкий // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 12. – С. 35-46.

82. Рогоцкий, Г. В. Интерференционное волновое инициирование процессов нефтегазоотдачи продуктивных пластов: монография / Г. В. Рогоцкий, А. Г. Соколов, П. В. Панкратьев. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2015. – 134 с.

83. Jenny, Hans. Cymatics / The Study of Wave Phenomena: Combined volumes One and Two. — Reprint ed. – NH: Macromedia Publishing, 2001.

84. Shapiro, Marcey. Transforming the Nature of Health: A Holistic Vision of Healing That Honors Our Connection to the Earth Others, and Ourselves. – North Atlantic Books, 2012. – 296 p.
85. Faraday, M. On a Peculiar Class of Acoustical Figures; and on Certain Forms Assumed by Groups of Particles upon Vibrating Elastic Surfaces / M. Faraday // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1831. – Т. 121. – p. 299–340.
86. Фабер, Т. Е. Гидроаэродинамика. – М.: Постмаркет, 2001. – С. 339–340.
87. Соловьянова, И. П. Теория волновых процессов. Акустические волны / И. П. Соловьянова, Шабунин С. Н. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 142 с.
88. Ганиев, Р. Ф. Колебательные движения в многофазных средах и их использование в технологии / Р. Ф. Ганиев. – Киев: Наукова думка, 1980. – 276 с.
89. Кузнецов, А. П. Лекции по теории колебаний и волн. Нелинейные колебания : учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / А. П. Кузнецов, С. П. Кузнецов, Н. М. Рыскин. – Саратов, 2011. – 289 с.
90. Рабинович, М. И. Введение в теорию колебаний и волн / М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. – М.: Наука, 1984. – 560 с.
91. Красильников, А. В. Введение в акустику / А. В. Красильников. – М.: МГУ, 1992. – 403 с.
92. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated Porous Solid (I. Low frequency range, II. Higherfrequencyrange) // J. Acoust. Soc. Amer. – 1956. – V. 28. – P. 168-181.
93. Био, М. А. Механика деформирования и распространения акустических волн в пористой среде : сб. переводов иностр. статей / М. А. Био // Механика.– 1963.– № 82.– С. 103–134.
94. Био, М. А. Обобщенная теория распространения акустических волн в диссипативных пористых средах : сб. переводов иностр. статей / М. А. Био // Механика. – 1963.– № 82.– С. 135–155.

95. Био, М. А. Теория упругости и консолидации анизотропной пористой среды : сб. переводов иностр. статей / М. А. Био // *Механика*. – 1957.– № 35.– С. 140–147.
96. Френкель, Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве / Я. И. Френкель // *Изв. АН СССР. Сер. география и геофизика*. – 1944. – № 4. – С.133–150.
97. Марфин, Е. А. Упругие волны в насыщенных пористых средах: учебно-методическое пособие / Е. А. Марфин, М. Н. Овчинников. – Казань: Казанский университет, 2012. – 28 с.
98. Николаевский, В. Н. Механика пористых насыщенных сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. – М.: Недра, 1970. – 335 с.
99. Хусаинов, И. Г. Мощность акустического поля, действующего на насыщенную жидкостью пористую среду / И. Г. Хусаинов // *Научно-методический журнал Novainfo.ru*. – 2017. – № 74. – С. 27-31.
100. Хусаинов, И.Г. Воздействие акустическим полем на насыщенную жидкостью пористую среду [Электронный ресурс] / И.Г. Хусаинов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/120-15160>.
101. Хусаинов, И. Г. Моделирование распространения и затухания акустических волн в пористой среде / И.Г. Хусаинов // *Научно-методический журнал Novainfo.ru*. – 2017. – №70. – С. 56-60.
102. Мартынов, В. Г. Геофлюидалные давления и их роль при поисках и разведке месторождений нефти и газа / В. Г. Мартынов, В. Ю. Керимов, Г. Я. Шилов, М. З. Рачинский. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 347 с.
103. Stoll, R.D. Reflection of acoustic waves at water-sediment interface / R.D. Stoll, Kan T.-K. // *J. Acoust. Soc.Amer.* – 1981.– № 1.– P. 149–156.
104. Столл, Р. Д. Акустические волны в водонасыщенных осадках / Р. Д. Столл // *Акустика морских осадков*. – М., 1977. – С. 28–46.

105. Городецкая, Н. С. Волны в пористо-упругих насыщенных жидкостью средах / Н. С. Городецкая // Акустический вестник. – 2007. – 10, №2. С. 43-63.
106. Yamamoto, T. Acoustic propagation in the ocean with a poro-elastic bottom / T. Yamamoto // J. Acoust. Soc. Amer.– 1983.– № 5.– P. 1578–1596.
107. Николаевский, В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред / В. Н. Николаевский. – М.: Недра, 1984. – 232 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А.1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
«Расчет показателей воздействия упругими колебаниями на продуктивный пласт»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021662139

**Расчет показателей воздействия упругими колебаниями
на продуктивный пласт**

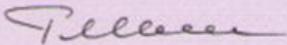
Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный университет» (ТИУ) (RU)*

Авторы: *Ведменский Антон Максимович (RU), Левитина
Екатерина Евгеньевна (RU), Аристов Артем Игоревич
(RU), Паклинов Никита Михайлович (RU), Мамчистова
Елена Ивановна (RU), Колев Жеко Митков (RU)*

Заявка № **2021661090**
Дата поступления **30 июня 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **22 июля 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Ивлиев**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Б.1. Справка об использовании результатов научных исследований ООО
«СибГеоПроект»

СПРАВКА

Об использовании результатов научных исследований
соискателя ученой степени кандидата технических наук
Ведменского Антона Максимовича

В диссертационной работе «Исследование влияния негармонических акустических колебаний на процесс фильтрации в нефтяном пласте и совершенствование технологии акустического воздействия на область дренирования» Ведменским А.М. предлагается усовершенствованный метод воздействия на призабойную зону пласта при помощи разработанной полезной модели «Устройство комплексного акустического воздействия на призабойную зону нефтяного пласта» (регистрационный номер 2021112699 от 30.04.2021 г.). Технология может быть использована при освоении скважины струйным насосом, за счет одновременного акустического воздействия и создания циклических изменений депрессии и репрессии на пласт.

Предлагаемая Ведменским А.М. полезная модель может быть использована при проектировании освоения скважины после бурения для восстановления фильтрационных характеристик призабойной зоны скважины за счет комплексного воздействия негармоническими колебаниями при одновременном вызове притока из пласта.

Начальник отдела научных исследований
и разработок ООО «СибГеоПроект», К.Т.Н.



Коротков С.А.

Б.2. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Научно-производственное объединение «СибТехНефть»



Общество с ограниченной ответственностью

**«Научно-производственное объединение «СибТехНефть»
(НПО «СибТехНефть»)**

ИНН 7204019193, КПП 720301001

Адрес: 625026, г. Тюмень ул. Республики, 143а, оф. 1501, БЦ «Газойл Плаза»

E-mail: sibtehneft@mail.ru, тел: 8-800-250-11-72

www.sibtehneft.ru

исх. № 2022/163

« 19 » июля 2022 год

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Ведменского Антона Максимовича**

Ведменским А.М. разработана прикладная программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать и прогнозировать эффективность применения технологии волнового воздействия в околоскажинной зоне пласта с целью повышения нефтеотдачи.

Программа «Расчет показателей воздействия упругими колебаниями на продуктивный пласт» зарегистрирована в реестре федеральной службы по интеллектуальной собственности 22.07.2021 г. под номером 2021662139 и передана в пользование ООО «НПО «СибТехНефть» и внедрена, путем использования результатов работы программы при обосновании эффективности планируемых методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации притока в проектом документе на разработку – Дополнение к технологической схеме разработки Аязовского нефтяного месторождения.

Директор ООО «НПО «СибТехНефть»



Копытов Андрей Григорьевич
(Ф.И.О)