

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

Научный руководитель **Мулявин Семен Федорович**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Тюменский индустриальный университет»,  
профессор кафедры «Разработка и  
эксплуатация нефтяных и газовых  
месторождений»

Официальные оппоненты: **Валеев Марат Давлетович**,  
доктор технических наук, профессор, АО НПП  
«ВМ система», технический директор  
**Дубинский Геннадий Семенович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет», доцент  
кафедры «Геология и разведка нефтяных и  
газовых месторождений»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный  
университет», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «15» декабря 2022 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.419.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-издательском комплексе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте [www.tyuiu.ru](http://www.tyuiu.ru).

Автореферат диссертации разослан «9» ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Пономарева Татьяна Георгиевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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 ( $k/\mu$ ) 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 ( $k/\mu$ ) 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 промысловую 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первом разделе** рассмотрены основные технологии акустического воздействия на продуктивные пласты с целью интенсификации притока и повышения нефтеотдачи, а также технические устройства и аппаратные комплексы для их реализации. Представлена классификация используемых в настоящее время внутрискважинных излучателей упругих колебаний в зависимости от способа генерации волны.

Анализ технологий показал недостаточную изученность процессов фильтрации при воздействии негармоническими волнами. В связи с этим автором были сформулированы задачи исследований влияния негармонических колебаний, включающих низко-, средне- и высокочастотные волны.

**Во втором разделе** проводится анализ широкого спектра лабораторных экспериментов и установок для исследования акустического, волнового воздействия на поровую среду. Сформулирована и представлена классификация физических эффектов, возникающих при фильтрации флюидов через образцы керна, в зависимости от частоты приложенного поля акустических колебаний (таблица 1).

Опираясь на экспериментальную базу, были сформированы следующие группы экспериментов по акустическому воздействию.

I группа экспериментов направлена на исследование влияния негармонических акустических колебаний на изменение критического градиента давления начала фильтрации.

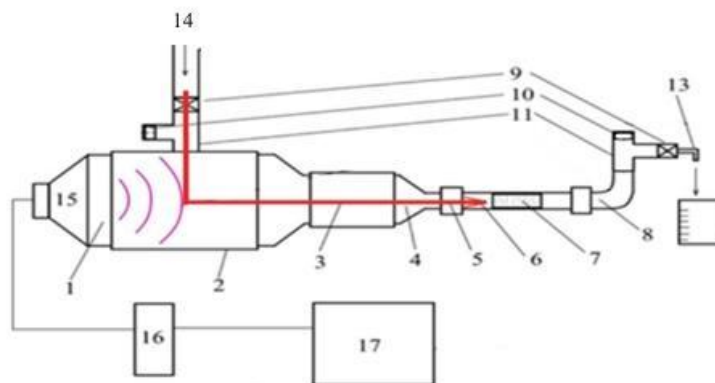
II группа экспериментов направлена на исследование влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности ( $k/\mu$ ).

III группа экспериментов направлена на исследование влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент вытеснения нефти водой.

Таблица 1 – Классификация опыта предыдущих исследований в зависимости от частоты акустического воздействия

№, п/п	Частота колебаний	Эффекты	Авторы исследований
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.
3	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 > 17000 Гц	Повышение скорости фильтрации в поровой среде за счет снижения динамической вязкости.	Кныш Ю.А., Лукачев С.В., Россия, 1980 г.

Для экспериментов была разработана и собрана лабораторная установка (рисунок 1) и отобраны образцы керна, разделенные на 2 группы: с высокой и низкой проницаемостью.



1 – корпус, 2 – компрессионный обжим, 3 – муфта, 4 – переходное соединение, 5 – соединительный фитинг, 6 – сменная гильза с керном, 7 – образец керна в гильзе, 8 – отвод, 9 – краны, 10 – сальниковые уплотнения, 11 - входной и выходной тройники, 13 – резиновая трубка, 14 – входное отверстие для подачи жидкости, 15 – акустический излучатель, 16 – усилитель акустического сигнала, 17 – компьютер для генерации сигнала.

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по негармоническому акустическому воздействию на процесс фильтрации

Исследования проводились следующим образом: на входе жидкости в образец керна создавалось гидростатическое давление, уровень которого постепенно повышался. Проводилась регистрация уровня давления, при котором начиналась фильтрация воды через керна. Было исследовано 5 образцов высокопроницаемого керна. Результаты определения представлены на рисунке 2.

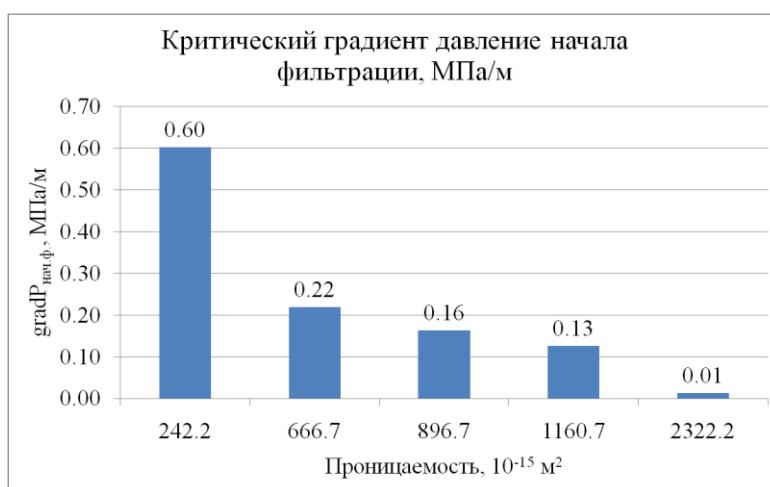


Рисунок 2 – Определение критического давления начала фильтрации

Диаграмма показывает, что значение критического градиента давления начала фильтрации снижается с ростом проницаемости, что соответствует теории (Н.Н. Павловский, В.Н. Щелкачев, П.А. Кусаков, К.Е. Ребиндер, Ф.А. Зинченко, М. Маскет).

Затем последовательность действий повторялась, но уже при акустическом воздействии. По указанной схеме эксперимента были исследованы негармонические волны с разными комбинациями частот и амплитуд (всего 16 волн). В результате были построены зависимости градиента давления начала фильтрации для образцов с разной абсолютной проницаемостью. Максимальный эффект (снижение на 15 %) наблюдался при воздействии негармоническими акустическими колебаниями, включающими 4 волны из низко-, средне- и высокочастотного диапазона:

$$p(t) = 100 \cos(2\pi t \cdot 10) + 50 \cos(2\pi t \cdot 100) + 35 \cos(2\pi t \cdot 1000) + 15 \cos(2\pi t \cdot 17000), \quad (1)$$

где  $p(t)$  – функция амплитуды от времени, описывающая негармоническую волну, мПа.

По результатам были получены аппроксимационные уравнения (рисунок 3).

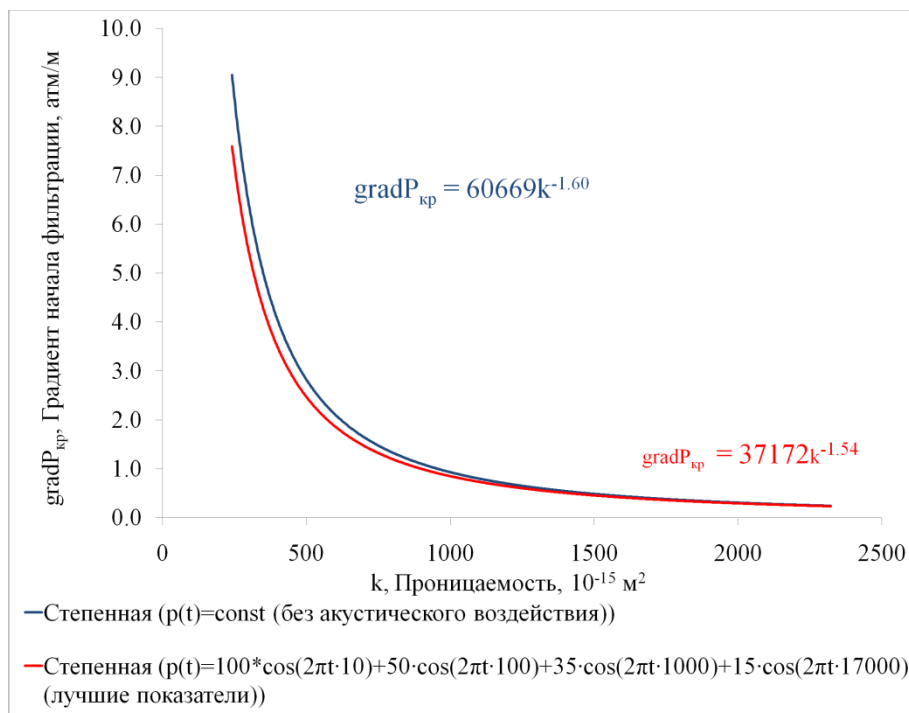


Рисунок 3 – Аппроксимации полученных результатов

Для второй группы экспериментов были получены зависимости коэффициента подвижности при фильтрации воды через образцы низко- и высокопроницаемого керна.

После этого проводилось воздействие негармоническими акустическими колебаниями с тремя разными амплитудно-частотными характеристиками (формулы (2), (3), (4)):

$$p(t)=100\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 10)+65\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 100)+35\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 1000), \quad (2)$$

$$p(t)=90\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 10)+35\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 1000)+15\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 17000), \quad (3)$$

$$p(t)=100\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 10)+50\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 100)+35\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 1000)+ \\ +15\cdot\cos(t\cdot 2\pi\cdot 17000). \quad (4)$$

Наилучший средний результат, выраженный в повышении коэффициента подвижности на 19 %, был получен для группы низкопроницаемого керна при воздействии волной из первой группы экспериментов (4), в отличие от воздействия волнами, включающими только 3 частоты. Для керна с самым высоким показателем коэффициента абсолютной проницаемости эффект от воздействия минимальный (рисунок 4).

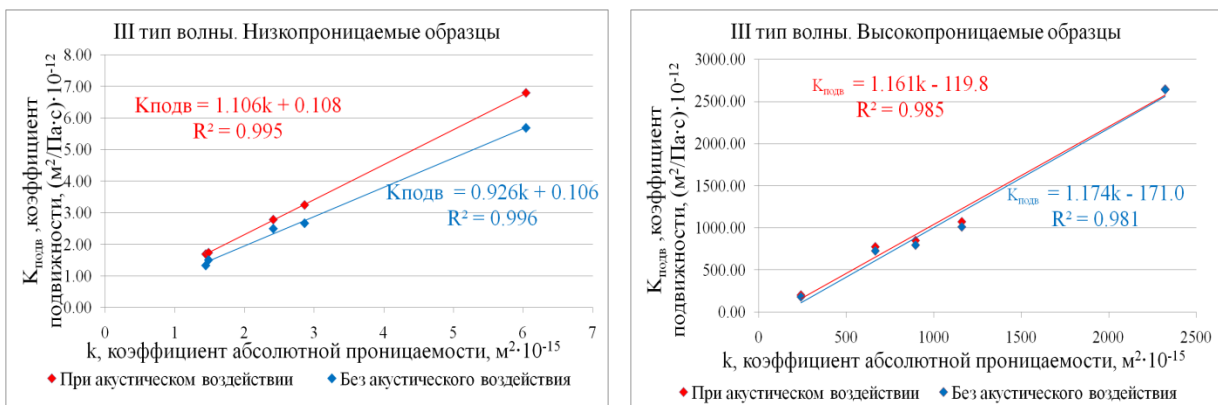


Рисунок 4 – Результаты влияния акустического воздействия III типа профиля волны на коэффициент подвижности

На рисунке 5 представлена обобщенная диаграмма относительной эффективности акустического воздействия на образцы из обеих групп (низко- и высокопроницаемый керн).

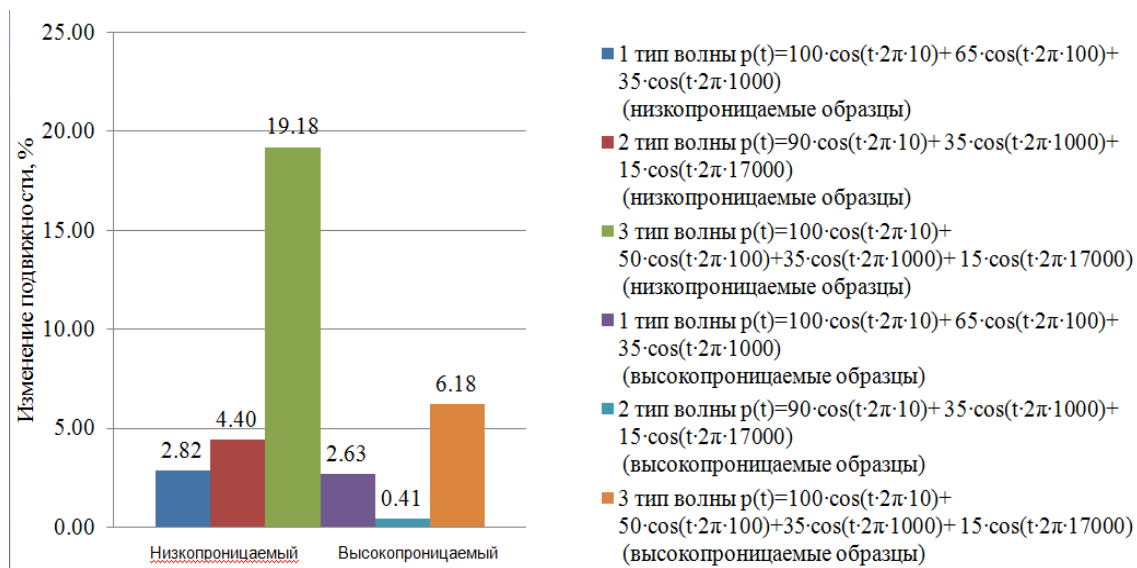


Рисунок 5 – Обобщенная диаграмма результатов исследования влияния негармонических акустических колебаний на коэффициент подвижности

Наиболее эффективным оказалось акустическое воздействие с III типом волны (формула (4), рисунок 6).

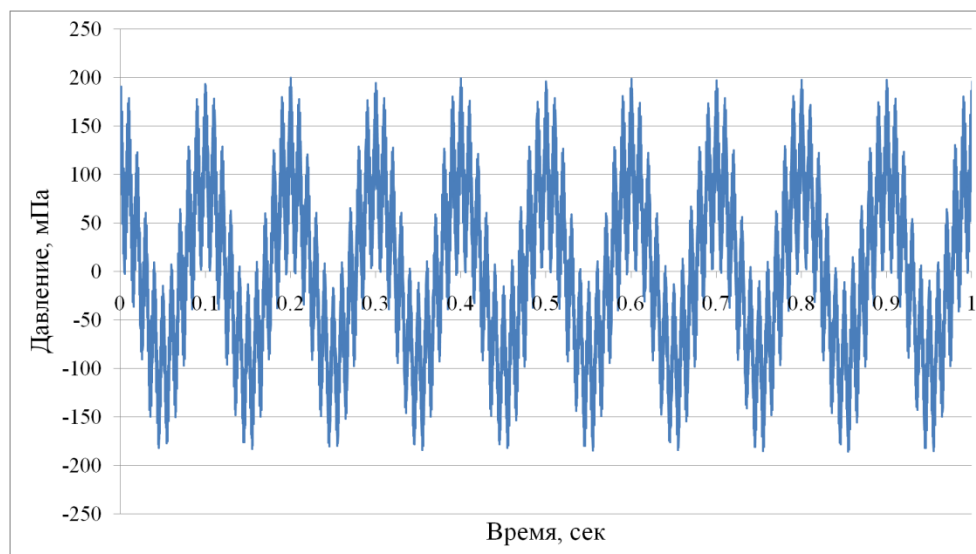


Рисунок 6 – Профиль волны III типа

Третья группа экспериментов направлена на оценку влияния акустического воздействия на коэффициент вытеснения модели нефти водой. В ходе первого этапа эксперимента определялся коэффициент извлечения нефти путем прокачки воды через насыщенные моделью нефти образцы керна. По каждому образцу производились замеры вытесненного количества модели нефти и расчет коэффициента вытеснения без и при акустическом воздействии.

Результаты экспериментов представлены на диаграмме (рисунок 7).

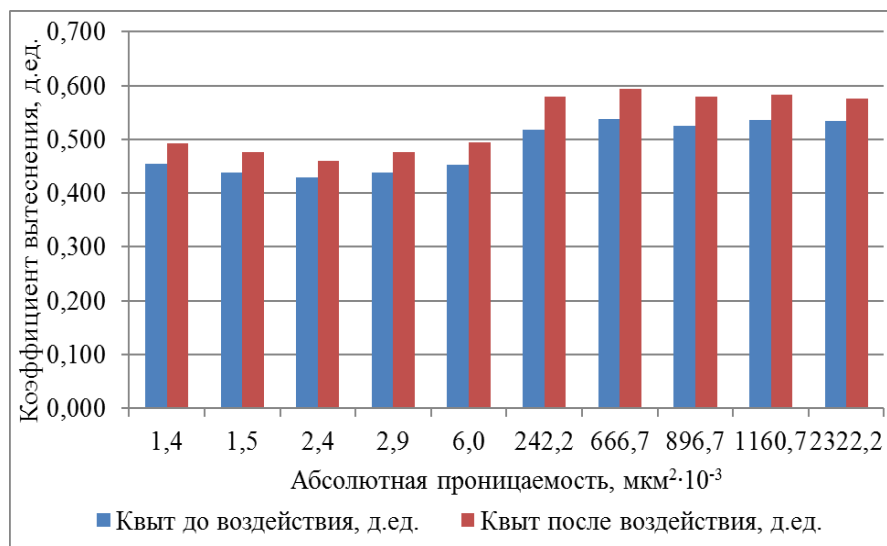


Рисунок 7 – Результаты изменения коэффициента вытеснения при воздействии негармоническими акустическими колебаниями

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 (на 9 % среднем по всем исследованным образцам).

Данный эффект может быть объяснен изменением капиллярных сил, разрушением облитерационных слоев в поровых каналах, вымещением конгломератов из тупиковых пор из-за средне- и низкочастотных составляющих волны, что подтверждается исследованиями других ученых.

**В третьем разделе** предложена технология воздействия на призабойную зону пласта при помощи негармонических акустических колебаний при одновременной работе насосного оборудования.

Технология осуществляется в следующей последовательности (рисунок 8):

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

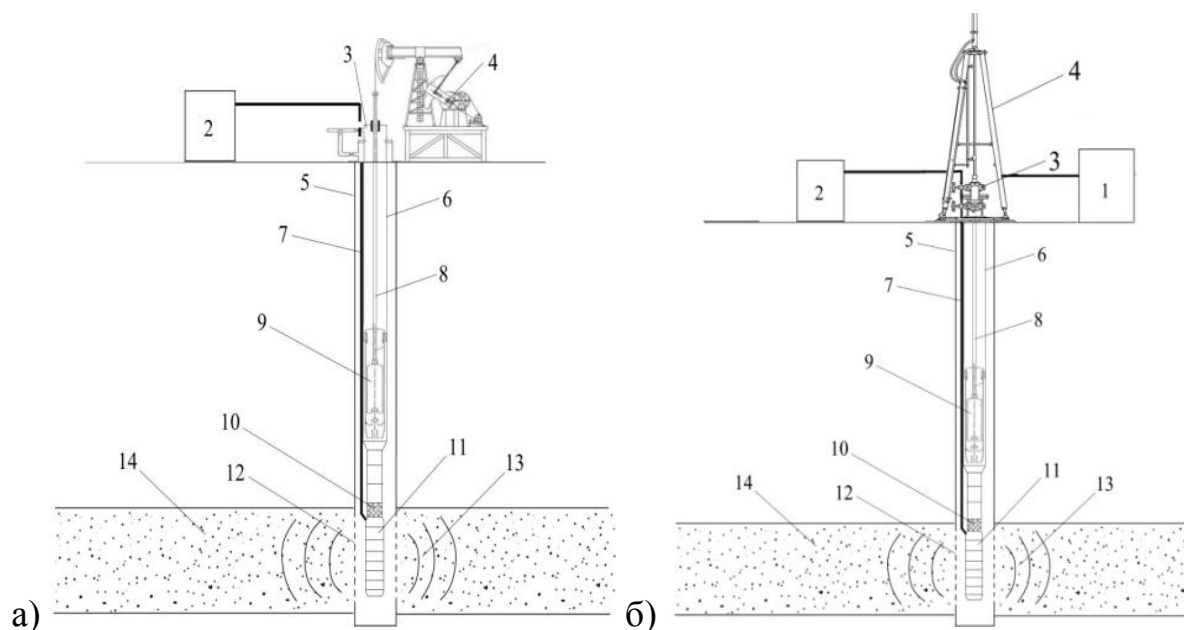


2. В скважину спускается насос (9), подвешенный на штангах (8), приводимый в работу станком качалкой (4) (рисунок 8 а) или гидроприводом (рисунок 8 б).

3. Далее производится настройка сигнала и запуск акустического излучателя.

4. После этого в работу запускают ШГН.

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



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

В результате гидродинамического моделирования эффектов 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 (рисунок 9). Технологическую эффективность за 2 года работы скважины можно оценить в 777,6 т дополнительно добытой нефти.

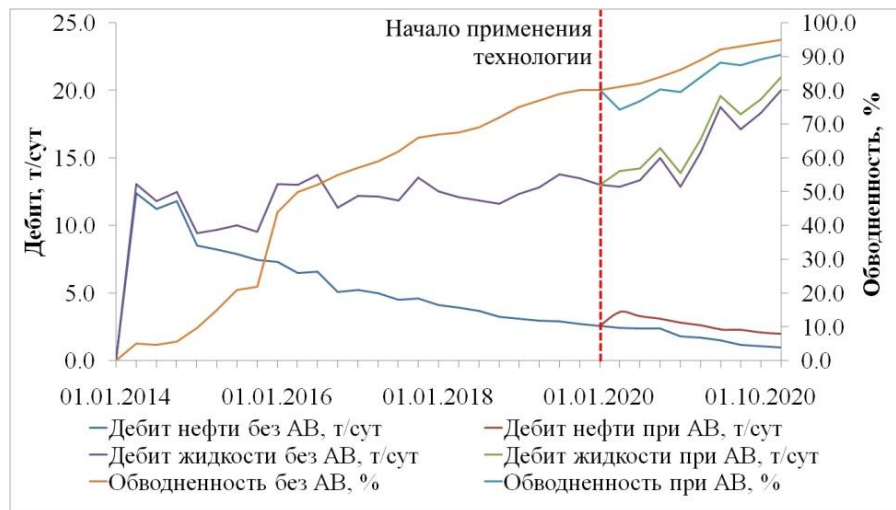


Рисунок 9 – Дебит скважины №5 по нефти, жидкости и обводненность

Экономическая оценка показала, что эффективность от внедрения технологии оценивается в 2246 тыс. руб. дополнительной прибыли с одной скважины в год, что является положительным денежным потоком для нефтегазодобывающего предприятия.

**В четвертом разделе** приводятся результаты гидродинамического моделирования при акустическом воздействии на область пласта с остаточными запасами нефти по предложенной автором методике с учетом распространения упругих колебаний от нескольких источников. В ходе исследования природы и свойств колебаний была выдвинута гипотеза о том, что в продуктивном пласте возможно создать поле упругих колебаний таким образом, чтобы в области с остаточными запасами нефти (целиками нефти) создать наиболее интенсивное акустическое воздействие, а в окрестностях – поле с минимальной интенсивностью, что приведет к вовлечению остаточных запасов нефти в процесс дренирования.

На основании исследований (Марфин, Е.А. Упругие волны в насыщенных пористых средах, 2012) оценим передачу акустической энергии через скважинную жидкость в пласт следующей формулой:

$$P(x; t) = 0,8 \cdot P_{\text{фл}}(x; t) + 0,2 \cdot P_{\text{ск}}(x; t), \quad (5)$$

где  $P$  – амплитуда, переданная внутрискважинным акустическим излучателем насыщенному коллектору, Па;

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

$P_{ск}$  – амплитуда давления, переданная скелету породы, Па.

В работах доктора наук Хусаинова Исмагиляна Гарифьяновича (г. Стерлитамак) говорится о распространении 2 типов продольных волн. Медленной волной он называет упругие колебания, которые распространяются по жидкой фазе, а быстрой – волну, которая распространяется по скелету породы. Опираясь на данные исследования, представим функцию распространения акустических колебаний в пласте для жидкой фазы:

$$P(x; t) = P_0 e^{-\delta x} \cos(xk - 2\pi f t + \phi), \quad (6)$$

где:

$$k = \frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} + 1}, \quad (7)$$

$$\delta = \frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} - 1}, \quad (8)$$

где  $t_\mu$  – параметр, учитывающий характеристики среды и насыщающего флюида, который можно найти по следующей формуле:

$$t_\mu = \frac{k\rho l_0}{m\mu}, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;

$m$  – пористость, д.ед.;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

Подставляя уравнения (7), (8) в (6), получим уравнение для медленной волны, которая передается по пластовому флюиду:

$$P_{фл}(x; t) = 0,8 \cdot P_{0пл} \exp\left(-x \frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} - 1}\right) \cdot \cos\left(x \left(\frac{2\pi f}{c_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} + 1}\right) - 2\pi f t + \phi\right). \quad (10)$$

С ростом расстояния от источника амплитуда давления в скелете горной породы будет уменьшаться по следующему закону:

$$P_{\text{ск}}(x) = P_0 e^{-\alpha x}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\text{м}^{-1}$ .

Коэффициент затухания акустических волн, проходящих по скелету породы, принят с учетом практически полного отсутствия влияния сдвиговой вязкости. Формула, определяющая коэффициент затухания волны в твердом теле, примет вид:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{\text{ск}}^3}, \quad (12)$$

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

Подставляя (12) в (11), после преобразования получим уравнение для быстрой волны, передающейся по скелету породы:

$$P_{\text{ск}}(x; t) = 0,2 \cdot P_{0\text{ск}} \text{EXP} \left( -x \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{\text{ск}}^3} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi f x}{C_{\text{ск}}} - 2\pi f t + \varphi \right), \quad (13)$$

Таким образом, формула, описывающая акустические колебания в пласте, принимает вид:

$$P(x; t) = 0,8 \cdot P_{0\text{пл}} \text{EXP} \left( -x \frac{2\pi f}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} - 1} \right) \cdot \cos \left( x \left( \frac{2\pi f}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + (2t_\mu \pi f)^{-2}} + 1} \right) - 2\pi f t + \varphi \right) + 0,2 \cdot P_{0\text{ск}} \text{EXP} \left( -x \frac{8\pi^2 f^2}{3C_{\text{ск}}^3} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi f x}{C_{\text{ск}}} - 2\pi f t + \varphi \right). \quad (14)$$

Представленные формулы легли в основу программы для ЭВМ «Расчет показателей воздействия упругими колебаниями на продуктивный пласт» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662139).

Опираясь на вышеизложенные заключения, автором была предложена методика подбора характеристик воздействия:

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 межскважинной зоне.

2. Определяются координаты центра найденного участка относительно нагнетательных скважин, из которых предполагается осуществлять 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. Определяется амплитуда, частота и фаза внутрискважинных источников колебаний таким образом, чтобы максимальная энергия приходилась в центр участка пласта с невыработанными запасами нефти, а поле с нулевым или околонулевым отклонением давления от текущего пластового было смещено к добывающим скважинам, образуя 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.

Для оценки возможности применения акустического воздействия на область, не охваченную процессом дренирования, были смоделированы различные поля колебаний давления. Поле с лучшими характеристиками представлено на рисунке 10.

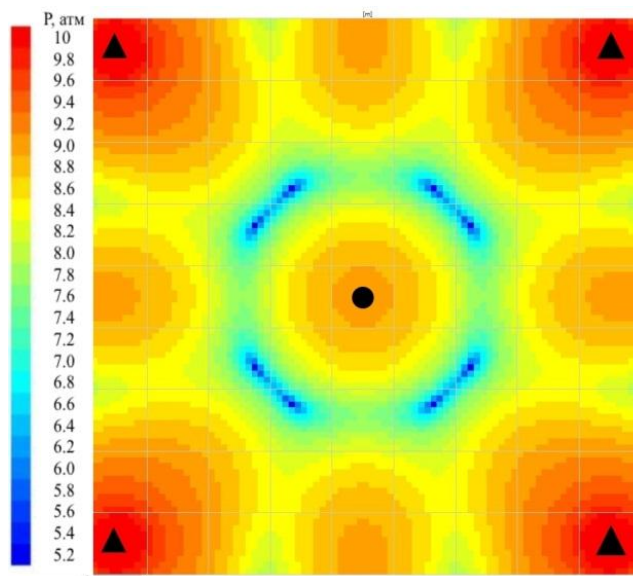


Рисунок 10 – Акустическое поле. Амплитуда 10 атм, частота источников 22,1 Гц

В качестве объекта исследования акустического воздействия на пласт с целью вовлечения в разработку невыработанных запасов нефти предлагается объект АС месторождения Западной Сибири.

Проведенный анализ работы добывающих скважин №№ 5, 6 в районе моделирования акустического воздействия показал, что добыча нефти в варианте 2 превышает добычу в 1 расчетном варианте, начиная с 2020 года и до конца прогнозного периода – до 2030 года (рисунки 11, 12).

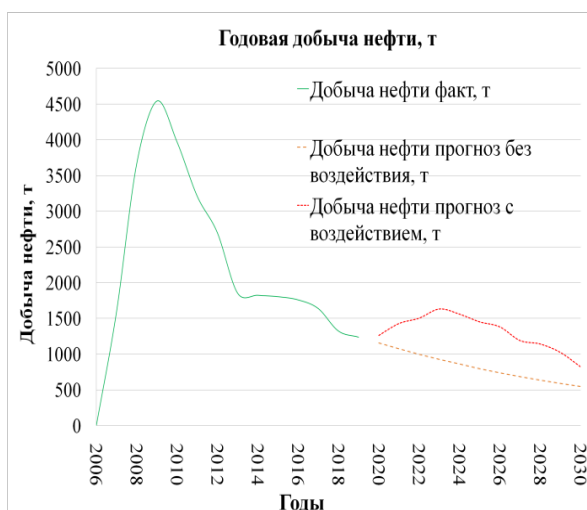


Рисунок 11 – Добыча нефти скв. №5

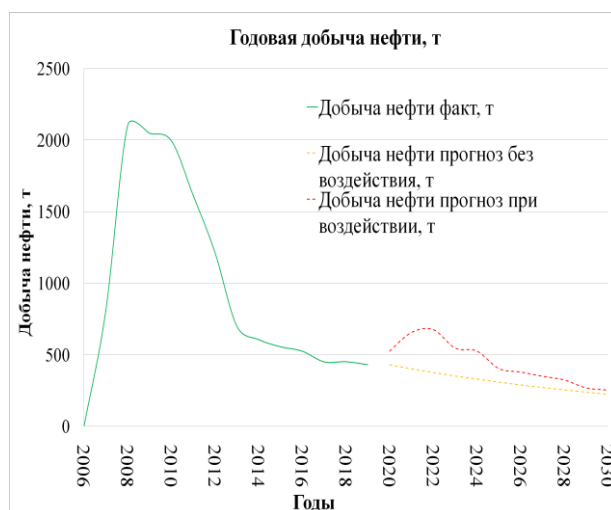


Рисунок 12 – Добыча нефти скв. №6

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

## **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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.**

**Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Ведменский, А.М. Воздействие на нефтесодержащий пласт физическими полями с целью увеличения нефтеотдачи. / Н.М. Паклинов, А.А. Барышников, А.М. Ведменский // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 2-2. - С. 90. (авторское участие 35 %).

2. 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. - 2018. - №5. - С. 82-83. (авторское участие 25 %).

3. Ведменский, А.М. Исследование влияния негармонических акустических колебаний на критический градиент давления начала фильтрации / А.М. Ведменский, С.Ф. Мулявин, Н.М. Паклинов // Естественные и технические науки. - 2021. - №6. - С. 88-89. (авторское участие 90 %).

**Статьи в базе цитирования SCOPUS:**

4. Vedmenskiy, 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. Vedmenskiy, A.V.



Strekalov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - 378 (1), - статья № 012105. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012105. (авторское участие 80 %).

5. Vedmenskii, A.M. Research work on the possibility of extracting remaining oil reserves by acoustic stimulation of pay layer. / N.M. Gerasimov, A.M. Vedmenskii, A.V. Strekalov, A.A. Baryshnikov. //6th Conference. Tyumen 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201900595. (авторское участие 60 %).

6. Vedmenskii, A.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 Conference. Tyumen 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201900621. (авторское участие 20 %).

#### **Статьи в других изданиях:**

7. Ведменский, А.М. О возможности применения инфразвука для повышения нефтеотдачи пластов. / А.М. Ведменский, А.А. Барышников, А.В. Стрекалов // «Наука и образование в XXI веке», международная заочная научно практическая конференция. -2013. - С. 18-19. (авторское участие 70 %).

8. Ведменский, А.М. Исследование возможности применения инфразвука для повышения приемистости нагнетательных скважин. / А.М. Ведменский, А.А. Барышников, Н.М. Паклинов, А.В. Стрекалов // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. - Томск - Т.2. - 2016. - С. 315-316. (авторское участие 70 %).