

*На правах рукописи*



ПРАЧКИН ВИКТОР ГЕННАДИЕВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ  
НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

25.00.17 –«Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2018

Работа выполнена на кафедре «Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель      доктор технических наук, доцент  
**Муллакаев Марат Салаватович**

Официальные оппоненты:    **Гильманова Расима Хамбаловна**  
доктор технических наук, профессор  
ООО НПО «Нефтегазтехнология», директор

**Судыкин Александр Николаевич**  
кандидат технических наук  
«ТатНИПИнефть», ПАО «Татнефть»/  
отдел исследования и промысловой подготовки  
нефти, газа и воды института, научный  
сотрудник

Ведущая организация      ФГБОУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет) имени И.М.  
Губкина (г. Москва)

Защита диссертации состоится «25» июня 2018 года в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

В последние десятилетия в РФ все большее внимание привлекают трудноизвлекаемые запасы нефти.

В связи с этим, актуальна разработка инновационных методов интенсификации добычи, которые позволяют значительно увеличить коэффициент извлечения нефти (КИН) из уже разрабатываемых пластов. Внедрение методов интенсификации добычи нефти на предприятиях нефтегазового комплекса РФ проводятся достаточно интенсивно, однако выбор того или иного метода требует научно обоснованного подхода.

В основу акустических методов интенсификации добычи нефти положены физические процессы, протекающие или создаваемые в призабойной зоне скважины (ПЗС) под действием ультразвука, основным из которых является нелинейное взаимодействие волны с жидкостью и породой коллектора. Одни методы ориентированы на декольматацию породы коллектора, другие – на воздействие на пластовую жидкость за счёт эффекта акустического течения. Перспективно направление комбинированного применения ультразвука совместно с химическими, тепловыми и гидродинамическими методами.

Использование ультразвукового воздействия для повышения продуктивности низкодебитных скважин в комбинации с другими методами интенсификации добычи нефти перспективно в настоящее время, но требует проведения комплексных научно-исследовательских работ и опытно-промысловых испытаний (ОПИ).

### **Степень разработанности проблемы**

Проблеме интенсификации добычи нефти с использованием волновых методов посвящены работы многих российских и зарубежных учёных: Ф.А. Агзамова, И.Г. Ахметова, Г.Г. Вахитова, С.М. Гадиева, Р.Ф. Ганиева, Ю.Л. Горбачева, В.П. Дыбленко, Ю.Ф. Жуйкова, О.Л. Кузнецова, Р.Я. Кучумова, М.А. Мохова, Р.М. Мавлютова, Р.Ш. Муфазалова, Э.М. Симкина, М.Л. Сургучева, Р.Г. Шагиева, Р.Я. Шарифуллина, Е. Ансела, М.А. Био и др.

## **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Область исследований соответствует паспорту специальности 25.00.17: Геолого-физические и физико-химические процессы, протекающие в пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр нефти и газа известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для создания научных основ эффективных систем разработки месторождений углеводородов и функционирования подземных хранилищ газа (п. 2).

### **Цель работы**

Интенсификация добычи нефти комбинированным методом на основе термоакустического и химического воздействия в геолого-промысловых условиях пласта.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1 Расчёт акустического воздействия на течение вязкой жидкости через цилиндрическую трубку.

2 Экспериментальное определение закономерностей воздействия акустического поля на скорость фильтрации нефти и эффективность термоакустической и химической обработки нефтей различного группового состава с целью снижения их вязкости.

3 Разработка комбинированного метода на основе термоакустического и химического воздействия интенсификации добычи нефти и термоакустического скважинного комплекса, определение его рациональных режимных и технологических параметров.

4 Опытно-промысловые испытания комбинированного метода на основе термоакустического и химического воздействия и термоакустического комплекса интенсификации добычи нефти.

### **Научная новизна**

1 Теоретически изучено и экспериментально доказано снижение вязкости жидкости в цилиндрической трубке в акустическом поле, ведущее к увеличению расхода жидкости. Экспериментально установлены закономерности фильтрации пластовой нефти в акустическом поле с использованием насыпных моделей различного гранулометрического состава.

2 Экспериментально установлена эффективность термоакустического и химического воздействия на нефти различного группового состава:

- обработка ультразвуком нефти Боровского месторождения позволяет дополнительно снизить вязкость на 10-30 %, в сравнении с ультразвуком и реагентом в отдельности;

- обработка ультразвуком нефти Усть-Тегусского месторождения позволяет дополнительно снизить вязкость на 10-15 %, в сравнении с ультразвуком и реагентом в отдельности;

3 Экспериментально установлена эффективность дополнения теплового воздействия ультразвуковым, позволяющая ускорить суммарное воздействие по снижению вязкости нефти на 17-20 % и увеличить время последующего восстановления вязкости нефти, что расширяет диапазон применимости технологий при воздействии в потоке различной интенсивности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В рамках выполнения ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (шифр «2011-2.7-527-004») ГК № 14.527.12.002 от 12.09.2011.

1 Разработан термоакустический автоматизированный скважинный комплекс, позволяющий интенсифицировать приток нефти комбинированным методом на основе термоакустического и химического воздействия.

2 Разработан технический регламент на основе термоакустической и химической обработки призабойной зоны скважины с использованием термоакустического скважинного комплекса.

3 Проведены опытно-промысловые испытания комбинированного метода на основе термоакустического и химического воздействия с использованием разработанного комплекса, которые показали:

- для обработанных скважин Самотлорского месторождения среднесуточный дебит жидкости увеличился на 11 %, среднесуточный дебит нефти – на 27 %, а средний коэффициент продуктивности – на 20 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин составляет 1 - 8 месяцев.

- для месторождений Самарской области результаты проведённой комбинированной обработки трёх скважин показали, что среднесуточный дебит

скважинной жидкости увеличился на 41 %, среднесуточный дебит нефти – на 24 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин составляет 1,5 - 4 месяца.

### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач выполнено на основе систематизации и анализа литературного материала, известных теоретических методов исследования механики жидкостей; стандартных физико-химических методов: реологические характеристики нефти определялись с учетом требований ГОСТ1747-91 и ASTM D4684, акустические параметры обработки контролировались с помощью сертифицированных методик SVAN-912M(AE) и AP19; геофизических данных обрабатываемых скважин; данных промысловых испытаний разработанного комбинированного метода и комплекса.

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Результаты математических расчетов воздействия акустического поля на течение вязкой жидкости в цилиндрической трубке. Закономерности фильтрации пластовой нефти в акустическом поле через насыпные модели различного гранулометрического состава.

2 Экспериментально установленные закономерности ультразвукового, химического и термического воздействия на нефти различного группового состава, снижающего их вязкость.

3 Метод термоакустического воздействия на призабойную зону терригенного пласта с применением термоакустического комплекса.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты исследований докладывались на: Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» (г. Курск, 2013 г.); Междунар. науч.-практ. конф. «Нефтегазопереработка-2013» (г. Уфа, 2013 г.), Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках: проблемы и пути решения» (г. Стерлитамак, 2015 г.), Междунар. научно-методической конф. «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля– 2016» (г. Салават, 2016 г.), Всерос. науч.-практич. конф. «Новые технологии в бурении скважин и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа» (г. Уфа, 2017 г.), Междунар. науч.-

техн. конф. «Экология и ресурсосбережение в нефтехимии и нефтепереработке» (г. Салават, 2017 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, из них 6 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста, включая 21 таблицу и 29 рисунков; состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы, включающего 201 наименование, и приложений.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, а также научная новизна и практическая значимость, приведена информация по апробации работы.

**В первой главе** приведены результаты обзора литературы, в котором изложены современные проблемы, связанные с извлечением нефти различными методами, изменением коллоидно-дисперсных свойств нефтяных дисперсных систем после ультразвукового воздействия, а также с применением волновых методов повышения производительности низкодебитных скважин.

Во всём мире наблюдается увеличение доли трудноизвлекаемых запасов, связанное с ухудшением структуры запасов нефти, увеличением количества месторождений с низкопроницаемыми коллекторами и высоковязкой нефтью. Структура запасов нефти усложняется из-за выработанности крупных месторождений, которые находятся в поздней стадии разработки, и значительной обводненности их продукции. Необходимо также отметить, что активно вводятся месторождения высоковязкой нефти, ранее не представлявшие промышленный интерес по причине отсутствия эффективных технологий воздействия.

Структура запасов нефти в РФ ухудшается, что выражается в росте доли трудноизвлекаемых запасов, выработанности крупных месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, а также значительной обводненности продукции. Необходимо создание новых комбинированных

технологий повышения добычи нефти, которые обеспечат эффективность добычи нефти, что требует проведения комплексных научно-исследовательских работ.

Первые опытно-промышленные образцы ультразвуковых скважинных приборов были разработаны в ВНИИЯГГ под руководством О.Л. Кузнецова и предназначались для акустического воздействия на малодебитные скважины с целью их очистки от грязи, кольматанта и промыслового парафина в стволе. В работах В.П. Дыбленко разработана классификация эффектов, возникающих в ПЗС при высокочастотной ультразвуковой обработке (УЗО) с интенсивностью более  $1 \text{ кВт/м}^2$ , когда проявляются нелинейные эффекты (акустические течения, звуковое давление, ударные волны), которые ведут к возникновению внутри поровой конвекции, увеличению проницаемости пористых сред, снижению динамической вязкости, изменению смачиваемости на границе раздела порода-флюид, увеличению газовыделения и теплопроводности насыщенных сред, что приводит к декольматации ПЗС и очистке каналов перфорации от АСПО и, в конечном итоге, к повышению продуктивности скважин.

На основе выполненного анализа состояния научной проблемы, определены цель и основные задачи.

Во **второй главе** описаны групповой и фракционный состав, физико-химические свойства исследуемых нефтей (таблица 1), а также характеристики химических реагентов, используемых в работе. Кратко описаны приборы и методика измерения физико-химических характеристик и реологических свойств нефтей, а также оборудование и методика измерения акустических характеристик.

Таблица 1 - Физико-химические свойства и групповой состав исследуемых нефтей

Нефть	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, мПа·с (при 20 °С)	Содержание, % мас.		
			Масла (в том числе n-алканы)	Смолы	Асфальтены
Усть-Тегусская	892	363	63,1 (3,0)	35,7	1,2
Боровская	910	1046	81,6 (4,5)	12,5	5,9
Самотлорская	851	5,8	90,1 (3,7)	8,7	1,2

Оборудование и методика измерения реологических характеристик нефти. Скорость сдвига ( $\text{с}^{-1}$ ), напряжение сдвига ( $\text{Па} \cdot 10^{-1}$ ) и динамическую вязкость исследуемых нефтей определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV-III

Ultra. В работе получены кривые зависимости вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига в интервале 0-85 ( $\text{с}^{-1}$ ) при температуре 20 °С. Измерения обрабатывались с использованием программы прибора «REOCALC» с погрешностью не более 3%. Динамическая вязкость образцов нефти определялась на измерителе низкотемпературных показателей нефтепродуктов ИНПН SX 850, который является ротационным вискозиметром при постоянной скорости сдвига 250 рад/с. Точность определения динамической вязкости пробы составляла 2 %, при точности измерения температуры  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , причем были учтены требования ГОСТ1747-91 и ASTM D4684.

Комбинированную обработку проб нефти проводили по следующим методикам:

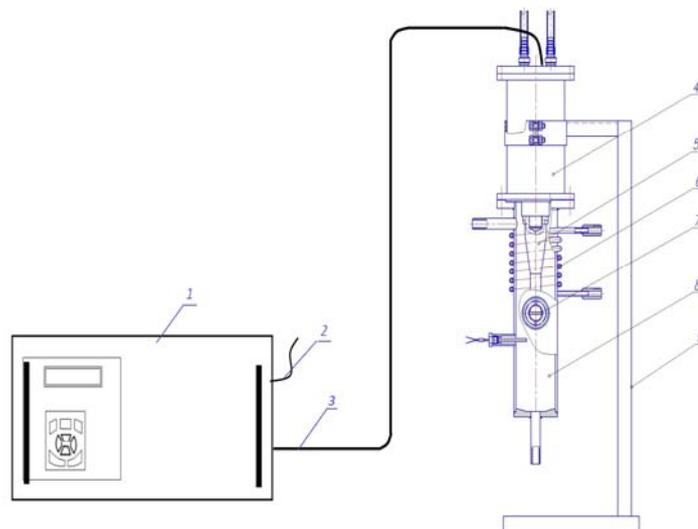
- *методика ультразвуковой обработки нефти:* исходную пробу нефти термостатировали в ячейке прибора ИНПН SX 850 в течение 25-30 минут и измеряли вязкость. На лабораторной установке проводили акустическую обработку проб нефти в течение 2 - 10 минут. Пробу нефти помещали в ячейку вискозиметра, термостатировали 25-30 минут и проводили измерения вязкости.

- *методика реагентной обработки нефти:* пробу нефти нагревали до 50 °С, термостатировали в течение 25-30 минут, затем охлаждали до 20 °С, термостатировали ещё в течение 25- 30 минут и проводили измерения на приборе. Дозу реагента (1 - 4 % масс.) добавляли в нефть, термостатировали в течение 25-30 минут, затем охлаждали до 20 °С, термостатировали 25-30 минут и проводили измерения реологических параметров нефти;

- *методика комбинированной обработки нефти:* повторяли все вышеописанные позиции. На лабораторной установке проводили акустическую обработку в течение 2 - 10 минут. Пробу нефти после фильтрации охлаждали до 20 °С, термостатировали в течение 25-30 минут и измеряли значение вязкости пробы.

Оборудование и методика измерения акустических характеристик. Обработка проб нефти осуществлялась на ультразвуковой установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Установка предназначена для ультразвуковой активации физико-химических процессов в жидкой дисперсной среде. Установка состоит из ультразвукового генератора и технологического блока (реактор, магнестрикционный преобразователь, волновод) на монтажной стойке.



1 – генератор УЗГ-2, 2 – кабель питания, 3 – выходной кабель, 4 – электоракустический преобразователь МСП 18/2, 5 – волновод, 6 – термостатирующий радиатор, 7 – окно визуализации, 8 – реактор, 9 – монтажная стойка

Рисунок 1 – Блок-схема ультразвуковой установки

Нефть загружается в исходную ёмкость, затем с помощью дозирующего насоса перекачивается в реактор, где проводится ее обработка с последующей перекачкой обработанного сырья в приёмную ёмкость. Генератор позволяет варьировать мощность и частоту подаваемого сигнала. Режимные и технологические параметры: тип и объем нефти, температура и давление в реакторе, мощность подаваемого акустического сигнала и его частота, а также время обработки и другие параметры определяются условиями эксперимента.

Методика экспериментов предусматривала акустическую обработку в реакторе порции нефти объёмом 500-1000 мл, в том числе, с введёнными реагентами при температуре 50 °С. Обработка нефти проводилась с помощью концентрического волновода. При этом амплитуда колебаний торца волновода составляла 10-15 мкм.

Акустические параметры обработки контролировались с помощью цифрового виброметра SVAN-912M(AE) и миниатюрного вибропреобразователя AP19. Для независимой оценки акустической мощности, введённой в жидкую дисперсную среду, был использован калориметрический метод.

В третьей главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований комбинированного воздействия на вязкость нефтей различного группового состава.

Приведены расчёты акустического воздействия, генерируемого ультразвуковым излучателем на вязкую жидкость в цилиндрической полости радиусом  $R$ , длиной  $L$  и перепадом давления  $\Delta p$  на её концах.

Для определения расхода вязкой жидкости  $Q$  получено выражение (1):

$$Q = \rho \int_0^R r \, dr \int_0^{2\pi} d\varphi \, v = \frac{\pi R^4 \rho}{8\mu} \left\{ \frac{\Delta p}{L} + \rho \xi^2 \omega^2 k \right\} \quad (1)$$

где  $\rho$ - плотность жидкости, ( $\text{кг/м}^3$ );  $R$ ,  $L$ - радиус и длина канала соответственно, (м);  $v$  – скорость жидкости, (м/с);  $\Delta p$ - перепад давления, (Па);  $\mu$ - динамическая вязкость мПа·с,  $\xi$ - амплитуда УЗ колебаний, (м);  $\omega$ - частота УЗ колебаний, (рад/с);  $k$ - волновой вектор УЗ колебаний, ( $\text{м}^{-1}$ ).

Разделяя расход жидкости на спонтанную  $Q_0$  и вынужденную, связанную с УЗ воздействием  $Q_s$ , части, выражение (1) можно записать в следующем виде (2):

$$Q = Q_0 + Q_s, \quad Q_0 = \frac{\pi R^4 \rho}{8\mu} \frac{\Delta p}{L}, \quad Q_s = \frac{\pi R^4 \rho^2 \xi^2 \omega^2 k}{8\mu} \quad (2)$$

Вынужденные колебания стенок вызывают появление в вязкой жидкости течения с постоянной скоростью, которое можно интерпретировать как снижение сопротивления переносу жидкости, т.е. как уменьшение эффективной вязкости.

Вводя эффективную вязкость  $\mu_{\text{эфф}}$ , в формулу (2), можно переписать:

$$Q = Q_0 \frac{\mu}{\mu_{\text{эфф}}}; \quad \mu_{\text{эфф}} = \frac{\mu}{1 + \frac{Q_s}{Q_0}} \quad (3)$$

В работе проведены экспериментальные исследования влияния ультразвука на скорость фильтрации нефти с использованием насыпной модели на стенде, представленном на рисунке 2. В экспериментах использовали нефть Самотлорского месторождения (таблица 1).

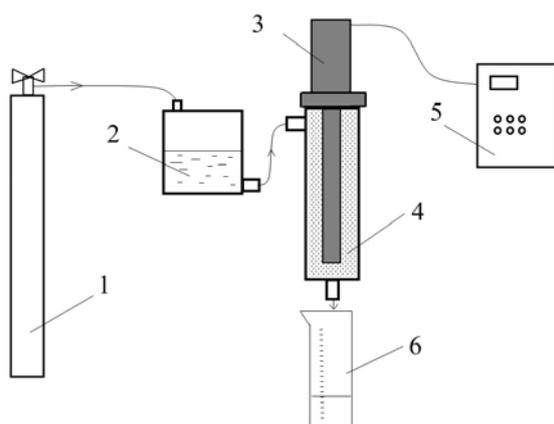
Стенд содержит исходную ёмкость 2 с нефтью, реактор 3 с введённым в него ультразвуковым скважинным прибором. Реактор представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 225 мм и высотой 1960 мм, оснащённый манометром, термопарой и виброметром для измерения соответственно давления, температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний в камере. Реактор также оснащён патрубками для залива и слива нефти. Для имитации породы была использована насыпная модель 4 из промытого и просеянного песка с размерами фракций 0,1 - 0,4 мм и 0,4 - 0,8 мм, который утрамбовывался в реакторе вокруг скважинного прибора. Нефть поступает в реактор из исходной ёмкости под давлением азота из баллона 1.

Эксперименты с насыпной моделью показали (рисунок 3), что без акустического воздействия скорость фильтрации пластовой нефти уменьшается в среднем 20 – 24 %. В то же время скорость фильтрации в ультразвуковом поле возрастает для песка с размерами фракций 0,1 - 0,4 мм в среднем на 14 – 58 % и для песка с размерами фракций 0,4 - 0,8 мм на 44 – 63 % в зависимости от подводимой акустической мощности. С увеличением мощности акустического воздействия на 30 % скорость фильтрации нефти возрастает в среднем на 20 %.

Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига исследуемых нефтей показали, что они являются неньютоновскими жидкостями. Но как известно из литературы, ультразвук способен за счёт нелинейных акустических эффектов разрушить надмолекулярные образования (мицеллы, ассоциаты), уменьшить их структурированность, и течение нефтей после УЗО становится подобно ньютоновским жидкостям.

Перспективные результаты получены на парафинистой высокосмолистой нефти Боровского месторождения (смолы – 12,5 %; асфальтены – 5,9 %).

Ультразвуковую обработку нефти проводили с интенсивность колебаний 2 Вт/см<sup>2</sup>. На рисунке 4 приведены результаты экспериментов зависимости динамической вязкости образцов нефти от скорости сдвига после УЗО, из которых видно, что динамическая вязкость после 3 мин обработки снижается примерно на 66 %, причём с увеличением времени воздействия эффект усиливается.

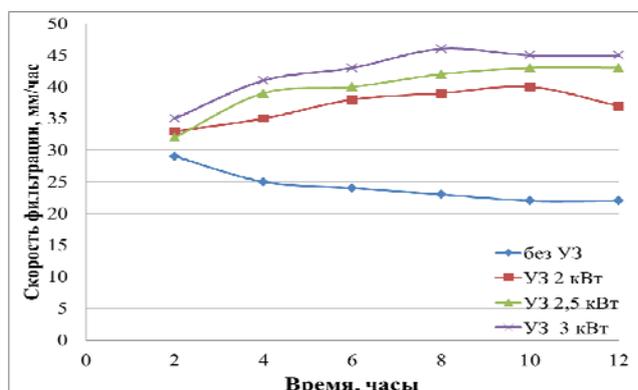


а)

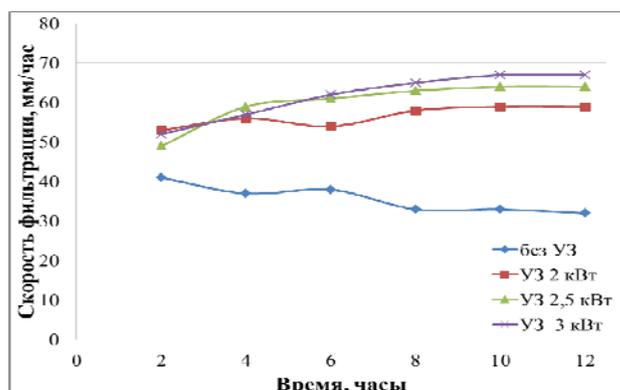
б)

а) схема экспериментального стенда: 1 - баллон с азотом, 2 – исходная ёмкость с пластовой нефтью, 3 – ультразвуковой скважинный прибор, 4 – насыпная модель, 5 – ультразвуковой генератор, 6 – приёмная ёмкость; б) общий вид стенда

Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования скорости фильтрации нефти в ультразвуковом поле



а)



б)

а) фракции 0,1 - 0,4 мм; б) фракции 0,4 - 0,8 мм

Рисунок 3 - Скорость фильтрации нефти через насыпную модель из песка

Измерения динамической вязкости образцов нефти в зависимости от времени хранения пробы показали, что обратное построение ассоциатов в нефти после УЗО, происходит в течение 20 часов (рисунок 5).

Результаты, полученные на пробах Боровской нефти с использованием реагента ИХН-100, иллюстрируются графиками на рисунках 6 и 7. Реагентная обработка проб нефти при введении 1, 2 и 3 % масс. реагента ИХН-100 снижает вязкость на 12, 32 и 43 % соответственно (рисунок 6).

Для комбинированной обработки на основе акустического и химического воздействия рациональными режимами являются УЗО в течение 3 минут при введении 2 % масс. реагента.

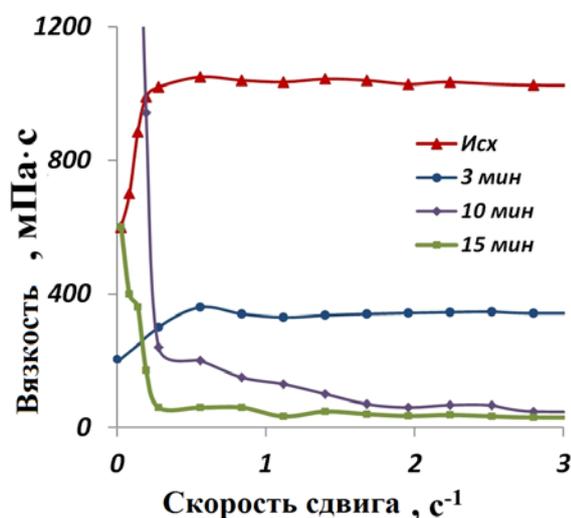


Рисунок 4 - Влияние времени УЗО на динамическую вязкость нефти Боровского месторождения

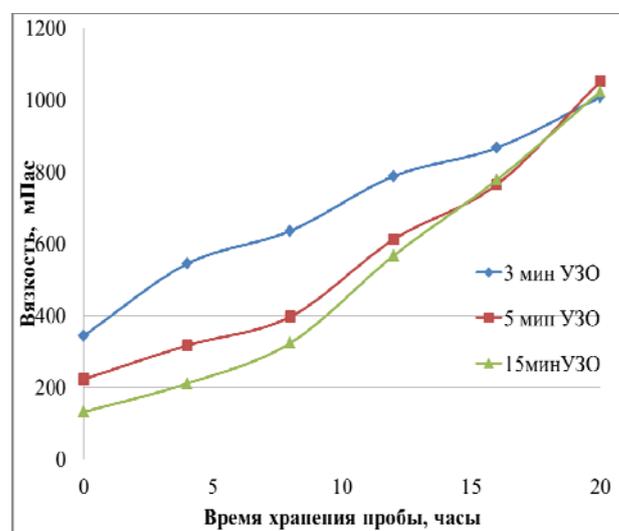


Рисунок 5 - Зависимость динамической вязкости нефти Боровского месторождения после УЗО от времени хранения пробы

Эффективно воздействие, включающее УЗО в течение 3 минут и разбавление 2% масс. ИХН-100, которое приводит к снижению вязкости на 75 % или дополнительно на 10-12 % чем УЗО и реагентная обработка в отдельности (рисунок 7).

На рисунках 8 и 9 представлены результаты, полученные на пробах Боровской нефти с использованием нефтяного реагента Р-12. Реагентная обработка проб нефти при введении 1, 2 и 3 % масс. реагента Р-12 снижает вязкость на 34, 67 и 76 % соответственно (рисунок 8). Эффективно комбинированное воздействие, включающее УЗО в течение 3 мин и разбавление 2% масс. реагента Р-12, которое приводит к снижению вязкости на 83 % или дополнительно на 20 % (рисунок 9).

На рисунке 10 представлены результаты экспериментов влияния УЗО на реологические свойства нефти Усть-Тегусского месторождения, которая характеризуется высоким содержанием смол (35,7 %) и асфальтенов (1,2%). Полученные зависимости динамической вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига, показали, что после УЗО изменяется ход реологических кривых, а также снижается вязкость исследуемых проб.

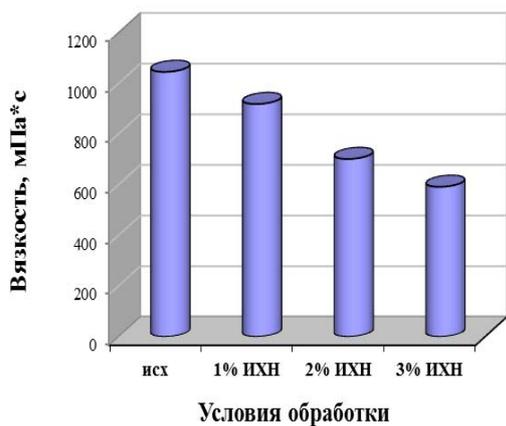


Рисунок 6 – Зависимость вязкость образцов нефти после обработки реагентом ИХН-100

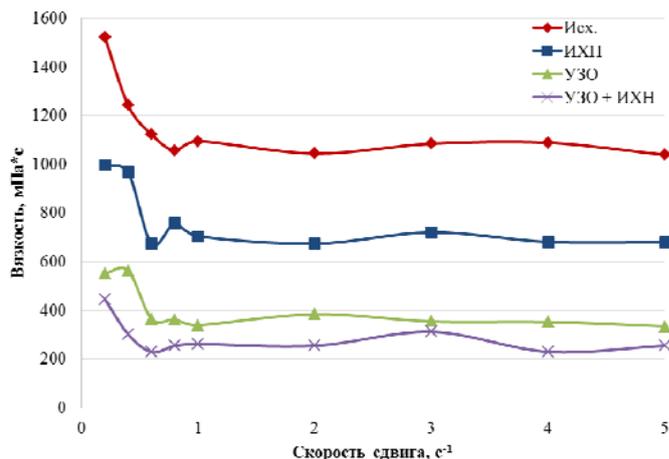


Рисунок 7 - Зависимость вязкости образцов Боровской нефти, после комбинированной обработки ультразвуком (3 мин) и 2 % масс. реагентом ИХН-100

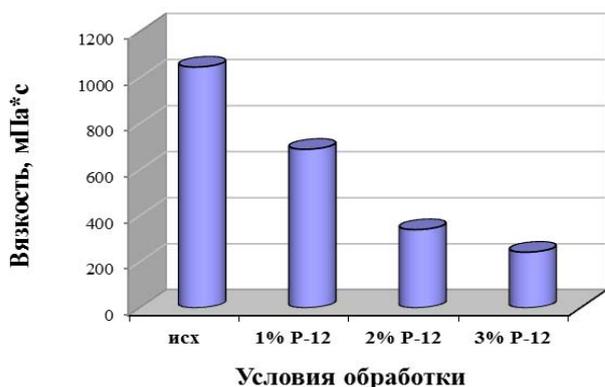


Рисунок 8 – Зависимость вязкости образцов нефти после обработки реагентом Р-12

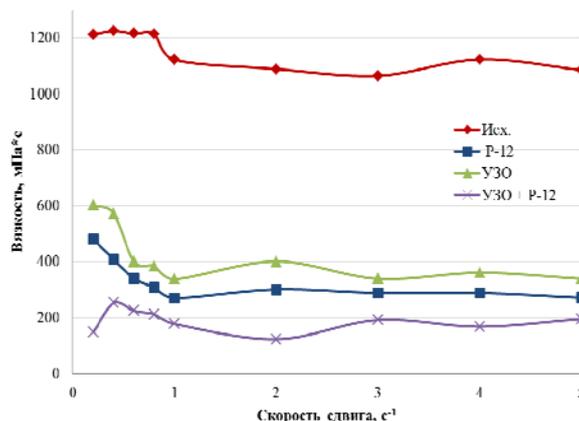


Рисунок 9 - Зависимость вязкости образцов Боровской нефти, после комбинированной обработки ультразвуком (3 мин) и 2 % масс. реагентом Р-12

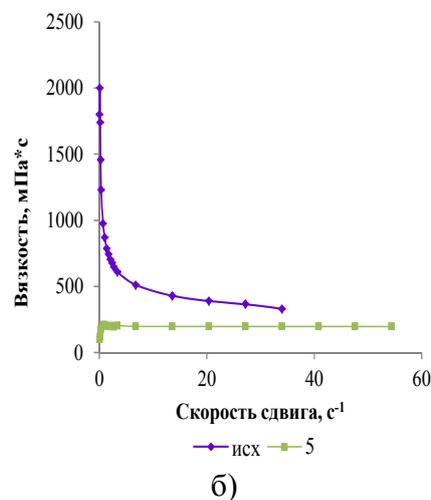
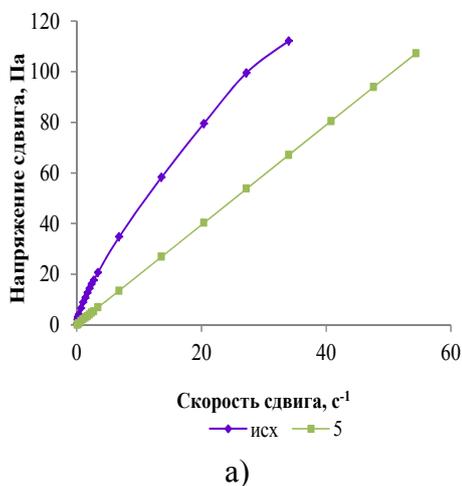


Рисунок 10 - Зависимость напряжения сдвига (а) и динамической вязкости (б) от скорости сдвига исходной нефти и пробы после УЗО в течение 2 мин

Во-первых, для исходной нефти, зависимость между напряжением сдвига и скоростью сдвига носит псевдопластичный характер, в то время как после ультразвуковой обработки характер течения нефти как у ньютоновской жидкости (рисунок 10, а).

Во-вторых, для исходной нефти зависимость вязкости от скорости сдвига носит неньютоновский характер, после ультразвуковой обработки нефть ведёт себя как тиксотропная жидкость в области малых скоростей, а с увеличением скорости сдвига - как ньютоновская жидкость (рисунок 10, б).

Эксперименты показали, что влияние УЗО на динамическую вязкость более значительно в области малых скоростей сдвига и при увеличении сдвиговой нагрузки эффективность обработки снижается. На рисунке 11 приведены экспериментальные данные влияния термической (ТО) и УЗО на динамическую вязкость нефти при скорости сдвига  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Как видно из рисунка 11, УЗО нефти Усть-Тегусского месторождения в течение 2 - 8 минут приводит к снижению вязкости на 20 - 40 %, ТО - на 5 - 35 %, совместной УЗО и ТО – на 30 - 45 %. Как видно из рисунка 11, эти способы воздействия различаются скоростью снижения вязкости: при УЗО значительное снижение вязкости происходит в первые минуты обработки, а при термической обработке снижение вязкости происходит медленно в течение всего интервала времени обработки,

Это подтверждается экспериментальными данными зависимости динамической вязкости нефти Усть-Тегусского месторождения от времени хранения пробы, приведённой на рисунке 12.

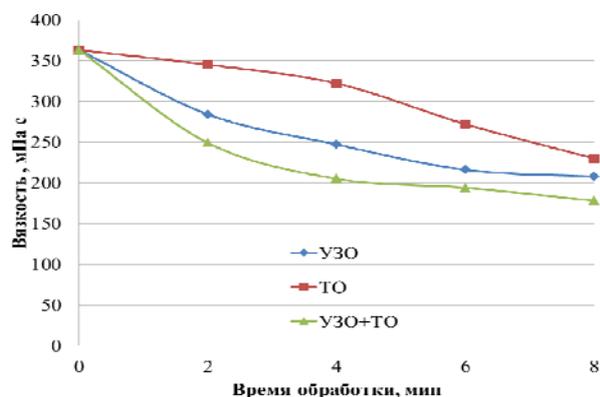


Рисунок 11 - Зависимость динамической вязкости нефти Усть-Тегусского месторождения от времени комбинированной обработки ( $\gamma = 0,1 \text{ с}^{-1}$ )

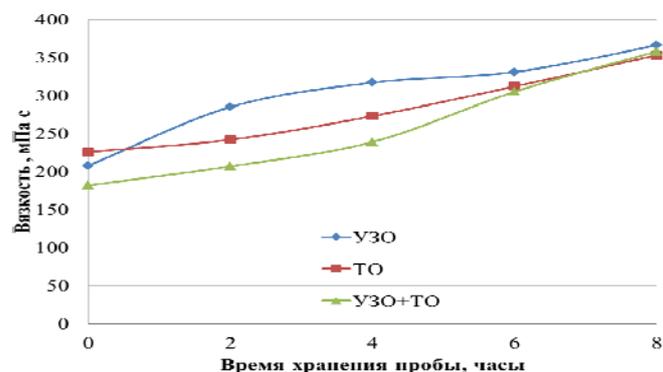


Рисунок 12 - Зависимость динамической вязкости нефти Усть-Тегусского месторождения от времени хранения пробы после комбинированной обработки

Проведённые исследования показали, что плотность, кислотное число, межфазное натяжение нефти на границе с водой практически не изменяются после УЗО. Также не выявлено изменения химического состава нефти после УЗО, о чём свидетельствует идентичность ИК - спектров и значений спектральных коэффициентов, рассчитанных для исходной нефти и проб, подвергнутых УЗО.

**Четвертая глава** посвящена разработке комбинированного метода на основе термоакустического и химического воздействия интенсификации добычи нефти с использованием термоакустического скважинного комплекса, а также опытно-промышленным испытаниям (ОПИ).

В состав комплекса входят станция управления, термоакустический скважинный прибор, эксплуатационная документация (ЭД), технологическая документация (ТД), комплект ЗИП-О. Термоакустический скважинный прибор монтируется на НКТ на постоянной основе и осуществляет ультразвуковое и термическое воздействие на призабойную зону скважины.

Термоакустический скважинный прибор предназначен для возбуждения акустических колебаний и индукционного нагрева на забое нефтяной скважины. Прибор состоит из двух секций: секции индукционного нагрева и секции термоакустического воздействия.

Разработан технический регламент компоновки оборудования, подготовки и эксплуатации комплекса в промышленных условиях.

Технология спуска и подъема прибора практически не отличается от технологии спуска и подъема нефтяных погружных насосов. С помощью акустического воздействия осуществляются очистка призабойной зоны скважины (ПЗС) и предварительный разогрев флюида.

На рисунке 13 приведена схема размещения комплекса в рабочем положении, а на рисунке 14- схема компоновки оборудования для обработки ПЗС комбинированным методом на основе термоакустического и химического воздействия.

Комбинированный метод обработки ПЗС на основе термоакустического и химического воздействия реализуется следующим образом.

1 Изучается история эксплуатации скважины, анализируются геолого-технические характеристики скважины и физико-химические свойства нефти, а также результаты геофизических исследований скважины (температура, давление, статический и динамический уровень скважины, продуктивность и др.). На основе

проведённого анализа разрабатывается программа опытно-промысловых испытаний (ОПИ).

2 На поверхности на насосно-компрессорную трубу (НКТ) монтируют конструкцию в следующей последовательности: нефтяной насос (обычно ЭЦН), фильтр (при необходимости), перфорированный участок трубы, термоакустический скважинный прибор.

В случае эксплуатации комплекса в режиме сонохимической обработки ниже термоакустического скважинного прибора крепится клапан-распылитель, присоединённый к скважинному капиллярному трубопроводу, для подачи химического реагента в интервал перфорации.

3 Подключают: кабель питания 1 к скважинному излучателю, кабель питания 2 к нефтяному насосу. Кабели 1 и 2, а также скважинный капиллярный трубопровод фиксируются клямса-поясами на НКТ по мере их спуска в скважину.

4 Собранную конструкцию опускают в скважину согласно программе ОПИ.

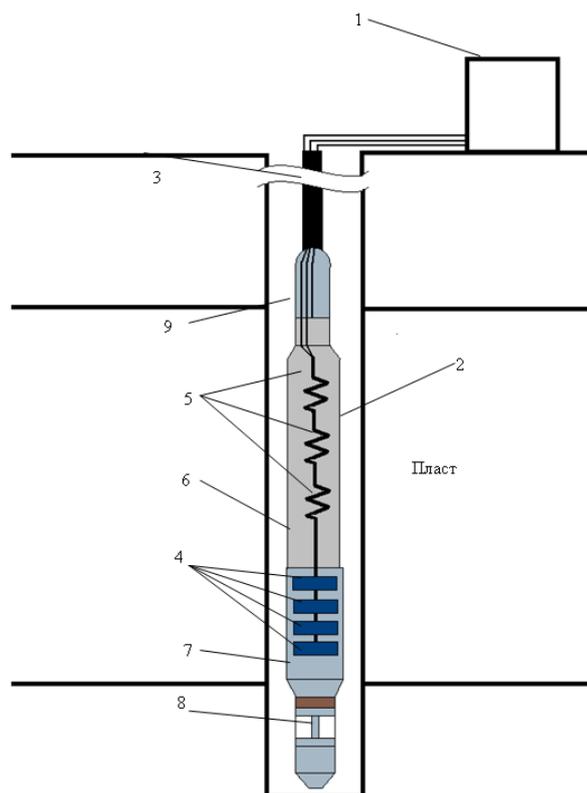
5 К распределительному щитку (или трансформатору) подключают станцию управления, а от нее с помощью электрического кабеля питание подаётся на термоакустический скважинный прибор, и задаются режимные параметры обработки ПЗС согласно плану ОПИ.

В случае сонохимической обработки реагент по наземному трубопроводу из ёмкости через установку дозирования, подаётся на устройство ввода капиллярного трубопровода в устьевую арматуру, а по нему доставляется к клапану-распределителю в зону перфорации.

6 Термоакустическая обработка осуществляется последовательно, сначала производится ультразвуковое воздействие на нефть с помощью УЗ излучателя, а затем производится тепловое воздействие на нефть с помощью индукционных нагревателей. В режиме сонохимической обработки подаётся химический реагент в интервал перфорации.

7 Включают насос, и начинается добыча нефти. Такой режим обработки обеспечивает эффективность добычи высоковязкой нефти.

8 Термоакустическое и химическое воздействие на прокачиваемую нефть осуществляется в зоне перфорированного участка обсадной трубы в периодическом режиме при постоянной работе нефтяного насоса. Режимы обработки задаются в плане ОПИ, затем уточняется в процессе добычи нефти.



1 - блок управления, 2 - скважинный прибор, 3 - кабеля питания, 4 – магнестрикционные излучатели, 5- индуктор, 6 - парамагнитная часть корпуса прибора, 7 - ферромагнитная часть корпуса прибора, 8 - компенсатор теплового расширения масла, 9-измеритель температуры

Рисунок 13 - Схема размещения комплекса в рабочем положении

9 Корректировка текущих рациональных режимов воздействия происходит также на основе измерения температуры и давления в призабойной зоне скважины.

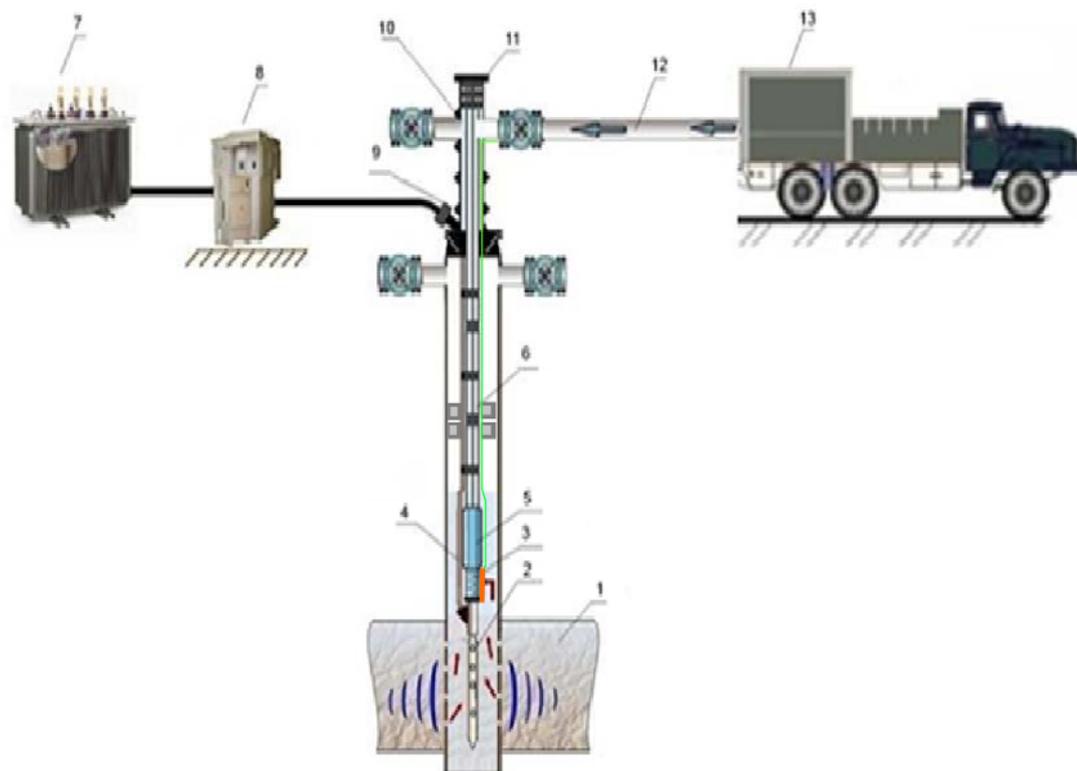
ОПИ комплекса и комбинированного метода обработки ПЗС были проведены на Самотлорском месторождении ОАО «Самотлорнефтегаз». Результаты ОПИ представлены в таблице 2.

Результаты ОПИ на Самотлорском месторождении показали, что среднесуточный дебит жидкости увеличился на 11 %, среднесуточный дебит нефти – 27 %, а средний коэффициент продуктивности – на 20 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин длилась от 1 до 8 месяцев.

На месторождениях ОАО «Самаранефтегаз» были проведена обработка скважин с использованием комбинированной технологии и комплекса, результаты которых приведены в таблице 3.

Динамика работы скважины № 407 Ветлянского месторождения (ОАО «Самаранефтегаз») представлена на рисунке 15, комбинированная обработка которой показала:

- скважина прибавила по дебиту жидкости в среднем  $10,8 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- по дебиту нефти прибавила в среднем на  $1,7 \text{ т}/\text{сут}$ ;
- через 1,5 месяца стабильной работы скважина вышла на уровень до обработки.



1– продуктивный пласт, 2 – скважинный прибор, 3 – клапан-распределитель, соединённый со скважинным капиллярным трубопроводом, 4- кабель, 5 – нефтяной насос, 6 – клапан распределитель, соединённый со скважинным капиллярным трубопроводом, 7 - трансформатор, 8 - станция управления комплексом, 9 - кабельный ввод, 10 – фонтанная арматура, 11 – сальник устьева с самоустанавливающейся головкой, 12- наземные трубопроводы, 13 – установка дозирования и ёмкость химических реагентов на автомашине

Рисунок 14 - Схема компоновки оборудования для обработки ПЗС с использованием комбинированного метода

Таблица 2 - Результаты обработки скважин Самотлорского месторождения

Куст	Скв.	Пласт	Режим до УЗО				Режим после УЗО					
			Q <sub>ж</sub> м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>н</sub> т/сут	Обв, %	К прод	Q <sub>ж</sub> м <sup>3</sup> /с ут	Q <sub>н</sub> т/сут	Обв, %	К прод	+/-Q <sub>ж</sub> м <sup>3</sup> /сут	+/-Q <sub>н</sub> т/сут
290	10896	БВ8	14,3	3,8	68,6	0,117	16,7	5,8	62,9	0,119	2,4	2,0
4303	81013	АВ(1-2)	12,0	7,2	8,0	0,127	15,5	12,4	5,8	0,193	3,5	5,2
1426	30590	АВ2-3, АВ4-5	32,7	8,4	57,6	0,539	36,0	21,0	31,0	0,242	3,3	12,6
1922	32357	АВ2-3, АВ1(3), АВ1(1-2)	10,0	5,2	38,6	0,080	12,1	7,5	26,9	0,139	2,1	2,3
48	35268	АВ4-5, АВ2-3	15,0	9,2	27,8	0,138	15,0	9,3	27,0	0,212	0,0	0,1
1421	37220	БВ8(1-3), АВ2-3, АВ1(3)	18,0	11,8	61,0	0,222	31,8	11,3	58,1	0,253	13,8	-0,5
1222	31113	АВ2-3, АВ4-5, АВ1(3)	30,0	1,8	93,0	0,192	31,0	1,7	93,2	0,216	1,0	-0,1
132	5022	БВ7(2), В8(0), БВ8(1-3), АВ2-3, АВ4-5, АВ1(3), АВ1(1-2), В10(1-2)	14,8	5,7	69,0	0,197	16,0	5,9	56,6	0,165	1,2	0,2
2112	26261	АВ1(1-2), АВ1(3), АВ2-3	19,0	3,7	77,0	0,111	17,7	3,3	77,4	0,174	-1,3	-0,4
2070	39373	БВ8(1-3), АВ4-5	19,3	1,9	87,9	0,177	21,6	2,6	85,5	0,194	2,3	0,7
1212	12257	БВ10(1-2), АВ4-5	16,0	10,2	22,8	0,041	18,0	11,6	23,6	0,167	2,0	1,4
1935	13905	АВ4-5, АВ2-3	25,0	2,7	87,0	0,073	32,8	2,5	90,8	0,250	7,8	-0,2
1174	27230	АВ1(3), АВ2-3, АВ1(1-2)	10,0	3,9	52,0		7,5	3,0	53,0	0,064	-2,5	-0,9
1247	9270	БВ7(2), БВ8(0), АВ1(1-2), В1(3)	45,0	3,1	72,0	0,174	43,6	10,3	72,4	0,536	-1,4	7,2
<b>Среднее значение</b>			<b>20,1</b>	<b>5,6</b>	<b>58,7</b>	<b>0,168</b>	<b>22,5</b>	<b>7,7</b>	<b>54,6</b>	<b>0,209</b>	<b>2,4</b>	<b>2,1</b>

Q<sub>ж</sub>–дебит жидкости, м<sup>3</sup>/сут; Q<sub>н</sub>–дебит нефти, т/сут; Обв -обводненность, %;

К–коэффициент продуктивности, м<sup>3</sup> / МПа сут.

Таблица 3 - Результаты ОПИ на месторождениях ОАО «Самаранефтегаз»

Месторождение	№скв	Пласт	Вязкость нефти, сПз	До обработки			После обработки		
				Q <sub>ж</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>н</sub> , т/сут	обв, %	Q <sub>ж</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Q <sub>н</sub> , т/сут	обв, %
Ветляное	407	Б2	2,62	36	10,1	66,0	46,8	11,8	69,7
Софьинско- Дзержинское	281	Д1	3,73	22	6,0	68,8	37,0	6,8	84,0
Солоцкое	31	Д3	2,29	48	14,0	65,0	65,0	18,5	38,0
<b>Среднее значение</b>				<b>35,3</b>	<b>10,0</b>	<b>66,6</b>	<b>49,6</b>	<b>12,4</b>	<b>63,9</b>

Результаты испытаний комбинированной обработки трёх скважин в ОАО «Самаранефтегаз» показали, что среднесуточный дебит жидкости увеличился на 41 %, среднесуточный дебит нефти – на 24 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин составляет от 1,5 до 4 месяцев.

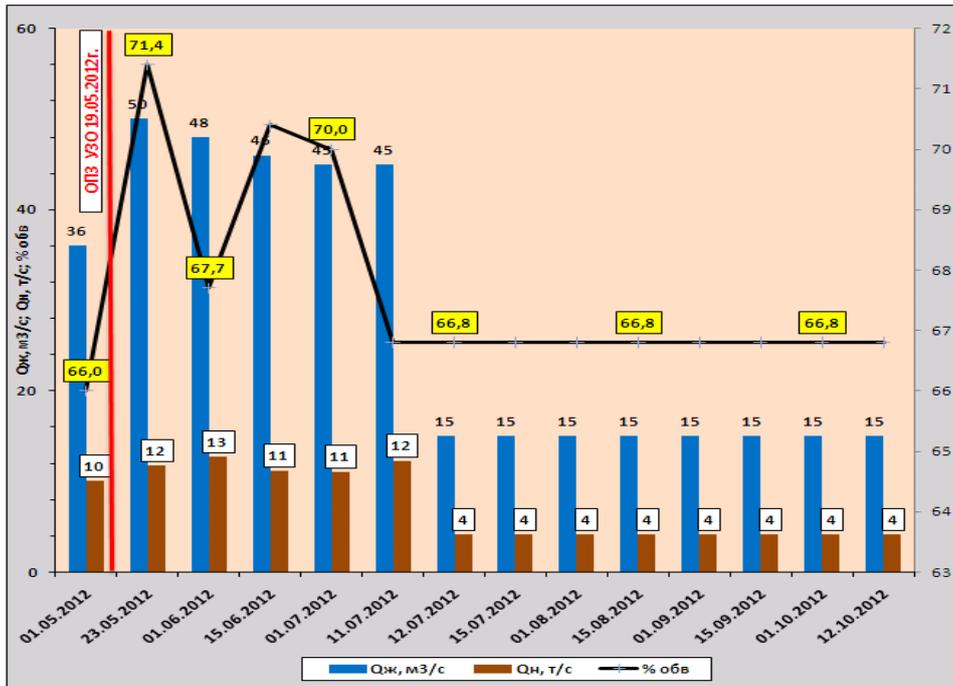


Рисунок 15 – Динамика работы скважины № 407 Ветлянского месторождения

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Расчёт воздействия акустического поля на вязкую жидкость, протекающую через цилиндрическую трубку, показал, что в результате в жидкости возникает акустическое течение с постоянной скоростью, ведущее к уменьшению ее эффективной вязкости и как следствие увеличению расхода жидкости.

2 Стендовые испытания по фильтрации пластовой нефти в акустическом поле с использованием насыпной модели показали, что скорость фильтрации в ультразвуковом поле возрастает для песка с размерами фракций 0,1 - 0,4 мм в среднем на 14 – 58 %, для песка с размерами фракций 0,4 - 0,8 мм -на 44 – 63 % в зависимости от акустической мощности.

3 Экспериментально установлена эффективность термоакустического и химического воздействия на нефти различного группового состава:

- обработка ультразвуком в течение 3 минут и разбавление 2% масс. реагентом ИХН-100 нефти Боровского месторождения позволяет снизить вязкость на 75 % или дополнительно на 10-30 %, в сравнении с ультразвуком и реагентом в отдельности;

- обработка ультразвуком в течение 3 мин и 2% масс. реагентом Р-12 нефти Боровского месторождения приводит к снижению вязкости на 83 % или дополнительно на 10-20 %, в сравнении с ультразвуком и реагентом в отдельности;

- обработка в течение 2- 8 мин нефти Усть-Тегусского месторождения приводит к снижению вязкости: ультразвуковой на 20-40 %, термической на 5 - 35%, совместной ультразвуковой и термической –на 30- 45 %.

4 Предложен комбинированный метод интенсификации добычи на основе термоакустического и химического воздействия с использованием термоакустического скважинного комплекса, а также технический регламент компоновки оборудования, подготовки и его эксплуатации в промышленных условиях, позволяющий проводить акустическую, термическую и химическую обработку призабойной зоны скважин.

5 Опытно-промысловые испытания комбинированного метода на основе термоакустического и химического воздействия и комплекса показали, что:

- для обработанных скважин Самотлорского месторождения среднесуточный дебит жидкости увеличился на 11 %, среднесуточный дебит нефти – на 27 %, а средний коэффициент продуктивности – на 20 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин составляет от 1 до 8 месяцев;

- для месторождений Самарской области результаты проведенной комбинированной обработки трёх скважин показали, что среднесуточный дебит скважинной жидкости увеличился на 41 %, среднесуточный дебит нефти – на 24 %. Продолжительность эффекта после обработки скважин составляет от 1,5 до 4 месяцев.

**Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в  
следующих научных трудах  
в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

1 Прачкин, В.Г. Изменение коллоидно-дисперсных свойств нефтяных систем с использованием ультразвукового воздействия / Прачкин В.Г., Галяутдинов А.Г., Баранов Д.А. // Нефтепромысловое дело. - 2015. - № 6. - С.58 -63.

2 Прачкин, В.Г. Применение ультразвука для интенсификации добычи нефти / Прачкин В.Г., Галяутдинов А.Г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». - 2015. - № 5. - С. 215-235.

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

4 Муллакаев, М.С. Исследование комбинированного воздействия ультразвука и химических реагентов на реологические свойства нефти Боровского месторождения» / Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Асылбаев Д.Ф., Прачкин В.Г. // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013.- № 5. С. 34-36.

5 Муллакаев, М.С. Исследование влияния ультразвуковой и термической обработки на реологические свойства нефти Усть-Тегусского месторождения / Муллакаев М.С., Асылбаев Д.Ф., Прачкин В.Г., Волкова Г.И. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2013. - № 9. - С. 11-13.

6 Муллакаев, М.С. Разработка комбинированной технологии и комплекса интенсификации добычи нефти с ультразвуковым воздействием/ Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Прачкин В.Г. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 4.- С. 12-15.

#### **в других изданиях**

7 Прачкин, В.Г. Влияние ультразвуковой и термической обработки на реологические свойства парафинистой нефти / Прачкин В.Г., Прокопцев В.О., Муллакаев М.С. // Междунар. научно-практическая конф. «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». Курск 2013. - С. 118-123.

8 Прокопцев, В.О. Ультразвук - экологически безопасный метод восстановления дебита нефтяных скважин / Прокопцев В.О., Прачкин В.Г., Муллакаев М.С. // Междунар. научно-практическая конф. «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». Курск, 2013.– С. 133-139.

9 Муллакаев, М.С. Влияние ультразвуковой и термической обработки на реологические свойства парафинистой нефти / Муллакаев М.С., Прачкин В.Г. // Материалы междунар. научно-практической конф. «Нефтегазопереработка-2013». Уфа. 2013. - С. 171-173.

10 Прачкин, В.Г. Акустическое воздействие на нефть в каналах призабойной зоны скважины / Прачкин В.Г. // Сб. материалов Всерос. научно-техн. конф. с междунар. участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения». – Т. 2. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 151-153.

11 Прачкин, В.Г. Сонохимическое воздействие на реологические свойства нефти Боровского месторождения / Прачкин В.Г. // Материалы междунар. научно-методической конф., посвящённой 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2016». – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 227-231.

12 Прачкин, В.Г. Интенсификация добычи трудноизвлекаемой нефти комбинированным методом на основе ультразвукового воздействия / Прачкин В.Г. // Сб. материалов Всерос. научно-практической конференции молодых ученых «Новые технологии в бурении скважин и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти и газа». – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017.- С. 47-49.

13 Муллакаев, М.С. Разработка термоакустической комбинированной технологии и комплекса интенсификации добычи нефти / Муллакаев М.С., Прачкин В.Г. // Сб. материалов научно-техн. конф. «Экология и ресурсосбережение в нефтехимии и нефтепереработке, посвящённой 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала УГНТУ в г. Салавате» Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 74-77.