 На правах рукописи

ПАВЛОВ МИХАИЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОЧИСТКИ
ОТ АСФАЛЬТОСМОЛИСТЫХ И ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мастобаев Борис Николаевич

Официальные оппоненты: **Некучаев Владимир Орович**
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет» / заведующий
кафедрой физики

Коробов Григорий Юрьевич
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет» / ассистент кафедры «Разработка
и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет» (г. Самара)


Защита состоится 18 апреля 2019 года в 16:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 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.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2019 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

 Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При добыче, сборе, транспортировке и хранении нефти одной из проблем, вызывающих осложнения в работе технологического оборудования, емкостей и трубопроводов, являются асфальтосмолистые и парафиновые отложения (АСПО). Накопление АСПО в проточной части и емкостях приводит к резкому падению производительности системы – увеличению перепадов давления и сокращению полезных объемов. На сегодняшний день существует и довольно эффективно используется множество методов борьбы с АСПО нефти, в большинстве своем основанных на термохимических методах, использование которых связано с высокими затратами и снижением уровня безопасности производимых работ. Существующие методы чисто механического воздействия не дают высоких результатов в трубопроводах, поскольку обычные скорости потока не обеспечивают необходимые усилия для воздействия скребков на плотные слои АСПО. Опыт по виброобработке высокопарафинистых застывающих нефтей показал наличие негативного эффекта на долговечность элементов конструкций трубопроводных систем.

Таким образом, на данный момент на объектах трубопроводного транспорта нефти отсутствуют эффективные, доступные и безопасные методы удаления АСПО.

В данной работе рассматривается возможность разрушения слоев АСПО под кавитационным воздействием ультразвуковых волн, генерируемых за счет преобразователей погружного и контактного пристенного типов.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами развития ультразвуковых технологий для применения в нефтяной и газовой промышленности занимались Абрамова А.В., Абрамов В.О., Абрамов О.В., Муллакаев М.С., Мастобаев Б.Н., Хафизов Ф.Ш. и др. Большинство работ было выполнено в последние два десятилетия, и в них отсутствуют требования и рекомендации к методам использования ультразвукового оборудования для удаления АСПО.

За рубежом данными вопросами занимались Хофштаттер Х., Шедид С., Джонсон П., Ван дер Бас Ф. и др. Следует отметить, что авторы подходят к вопросам применения ультразвука преимущественно для стимуляции призабойной зоны скважины, вопросам же его использования с целью зачистки резервуаров и трубопроводов должного внимания не уделяется.

Несмотря на большое количество работ о парафинизации магистральных нефтепроводов и методах борьбы с АСПО, метод ультразвуковой обработки изучен недостаточно полно. Тем не менее, при транспорте и хранении нефти в системах сбора и трубопроводного транспорта проблема парафинизации всегда оставалась и остается одной из ключевых, о чем свидетельствуют многочисленные исследования, особенно интенсивно проводимые с 1960 по 1990 годы.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема работы и содержание исследований соответствуют пункту 5 области исследований, определяемой паспортом специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: «5. Разработка научных основ и усовершенствование технологии хранения нефти, газа и нефтепродуктов и методов сооружения подземных и наземных газонефтехранилищ».

Цели и задачи работы

Исследование эффективности ультразвуковой обработки отложений нефти для разработки технологии зачистки резервуаров от донного осадка.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Анализ эффективности существующих методов предотвращения и удаления АСПО для обоснования преимущества ультразвуковой обработки отложений в процессе транспорта и хранения нефти;
2. Экспериментальные исследования кавитирующего и теплового эффектов ультразвуковой обработки на образцах отложений различных типов;
3. Моделирование процесса ультразвуковой обработки отложений в емкости с учетом совместного действия кавитирующего и теплового полей высокочастотного ультразвукового резонатора;

4. Определение технологических параметров при ультразвуковой обработке донных отложений резервуаров различных объемов – количества резонаторов, точек приложения, требуемой продолжительности и энергозатрат при работе излучателей.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено наличие синергетического эффекта кавитирующего и теплового полей, позволяющего производить разрушение донного осадка в 1,5 раза большей скоростью по сравнению с только тепловым воздействием той же мощности.

2. Разработана и обоснована новая математическая модель разрушения парафиновых отложений нефти в цилиндрических емкостях с помощью ультразвукового воздействия, одновременно учитывающая эффекты кавитационного и теплового воздействий.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены функциональные зависимости, позволяющие осуществить подбор параметров генератора ультразвуковых волн.

Произведен расчет основных технологических параметров обработки донных отложений в резервуарах различных типов и объемов.

Результаты выполненных в диссертационной работе исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» при обновлении рабочих программ дисциплин «Проектирование и эксплуатация нефтегазохранилищ и автозаправочных станций» и «Ресурсо-энергосберегающие технологии транспорта хранения нефти и газа» по направлению подготовки студентов «Нефтегазовое дело» специализации «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти и газа».

Методология и методы исследований

Методология выполнения работы заключалась в систематизации и анализе отечественного и зарубежного опыта теоретических и практических исследований; проведении экспериментальных исследований с использованием

ультразвуковой установки и воздействием на образцы АСПО, в том числе полученных с действующих магистральных нефтепроводов; визуальном изучении кавитационных процессов с использованием высокоскоростной камеры и микроскопа; математическом моделировании кавитационных процессов.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса ультразвуковой обработки нефти, учитывающая косвенный тепловой эффект резонаторов, позволила оценить среднюю величину увеличения тепловой мощности процесса в 1,5 раза по сравнению с обычным нагревом, и определить радиус эффективного действия ультразвуковых излучателей, лежащий в пределах от 0,5 до 1,0 м в зависимости от типа резонатора;

2. Механизм ультразвуковой очистки поверхности от отложений нефти, заключающийся в проявлении кавитационных полей под действием резонансных ультразвуковых колебаний, при этом максимальная амплитуда колебаний асимптотически стремится к определенному значению, в условиях эксперимента – к 40 В;

3. Методический подход для очистки резервуаров для хранения нефти от асфальтосмолистых и парафиновых отложений.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждена данными лабораторных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерения и на аттестованном оборудовании по общепринятым методикам, утвержденным в соответствующем порядке.

Основные положения и результаты работы докладывались на:

- на X, XI, XII учебно-научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт» (Уфа, 2015, 2016, 2017);
- на Международном форуме «5th Anlagen Forum», организованном немецким экспертным обществом (TÜV SÜD) (Вена, 2014);
- на Международной конференции «Petrochemical Engineering» (Дубай, 2017).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных трудах, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus, 3 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 174 наименования. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 53 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе выполнен анализ отечественного и мирового опыта по использованию различных технологий, средств и методов предотвращения и удаления АСПО на объектах добычи, хранения и транспорта нефти. Отдельно рассмотрено применение ультразвуковых методов для удаления отложений.

Несмотря на большое количество работ о парафинизации магистральных нефтепроводов и методах борьбы с АСПО, метод ультразвуковой обработки изучен недостаточно полно. Тем не менее при транспорте и хранении нефти в системах сбора и трубопроводного транспорта проблема парафинизации всегда оставалась на одном из первых мест, о чем свидетельствуют многочисленные исследования, особенно интенсивно проводимые с 1960-х по 1990-е годы.

Результаты лабораторных и промышленных экспериментов подтвердили, что на интенсивность парафинизации существенное влияние оказывают такие параметры, как:

- температурные условия перекачки;
- температура окружающей среды;
- скорость перекачки;

- содержание парафина и асфальтосмолистых веществ в нефти;
- время парафинизации;
- физико-химические свойства нефти;
- геометрические параметры трубопровода.

На сегодняшний день в промышленности применяется множество методов борьбы с АСПО (рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация методов ликвидации и предотвращения АСПО

Принципиально эти методы различаются на превентивные (предотвращение отложений) и непосредственную борьбу с уже выпавшими отложениями. Методы, относящиеся к физическим, основаны на действии механических и ультразвуковых колебаний (вибрационные методы), а также электрических, магнитных и электромагнитных волн. Существующие вибрационные методы основаны на создании в области парафинообразования колебаний, которые, воздействуя на кристаллы парафина, вызывают их микроперемещения, что препятствует осаждению на стенках труб. Воздействие магнитных полей следует отнести к наиболее перспективным из физических методов. По мнению некоторых специалистов, образование микропузырьков газа в центрах

кристаллизации после магнитной обработки обеспечивает газлифтный эффект.

Под действием магнитных полей на движущуюся жидкость происходит разрушение агрегатов, состоящих из субмикронных ферромагнитных микрочастиц соединений железа, находящихся в типичных концентрациях 10–100 г/т в нефти и попутной воде. В каждом агрегате содержится от нескольких сотен до нескольких тысяч микрочастиц, поэтому разрушение агрегатов приводит к резкому (в 100–1000 раз) увеличению концентрации центров кристаллизации парафинов и солей и формированию на поверхности ферромагнитных частиц пузырьков газа микронных размеров. В результате разрушения агрегатов кристаллы парафина выпадают в виде тонкодисперсной, объемной, устойчивой взвеси, а скорость роста отложений уменьшается пропорционально уменьшению средних размеров выпавших совместно со смолами и асфальтенами в твердую фазу кристаллов парафина.

Тепловые методы основаны на свойствах парафина плавиться при температурах выше 50 °С и стекать с нагретой поверхности. Для создания необходимой температуры требуется специальный источник тепла, который может быть помещен непосредственно в зону отложений или вырабатывать теплосодержащий агент.

В настоящее время используются следующие технологии с применением:

- горячей нефти или воды в качестве теплоносителя;
- перегретого пара;
- электропечей наземного и скважинного исполнения;
- электродепарафинизаторов (индукционных подогревателей), осуществляющих подогрев нефти в скважине;
- реагентов, при взаимодействии с которыми протекают экзотермические реакции.

Недостатками данных методов являются высокая энергоемкость, повышенная электро- и пожароопасность, во многих случаях – и ненадежность конструкции при достаточно невысокой эффективности.

Существует множество работ, в которых авторы отмечают изменение физических свойств жидкостей под воздействием ультразвука, например в работе Х. Хамиди представлена разработка методики непосредственного исследования влияния ультразвуковых волн на вязкости парафина, синтетического масла и керосина при различных частотах и мощностях воздействия. Эксперименты проводились как в контролируемом, так и в неконтролируемом температурных режимах в гладкой капиллярной трубке. Результаты показывают, что вязкости жидкостей уменьшаются при воздействии ультразвука, что может происходить за счет наведенного тепловыделения и кавитации внутри жидкости. Обсуждаются и интерпретируются особенности частоты, мощности и температуры ультразвука по снижению вязкости.

Тепловые методы по предотвращению и удалению отложений имеют ограничения по максимально допустимым температурам эксплуатации и не могут дать требуемой эффективности. Прогрев ниже температур плавления парафинов обычно не только малоэффективен, но и из-за интенсификации тепломассообменных процессов на границе нефть – стенка может привести к увеличению отложений.

Анализ существующих методов по предотвращению и удалению отложений нефти в процессе трубопроводного транспорта показал отсутствие в настоящий момент эффективной технологии, которая позволила бы бороться с отложениями без прямого воздействия на состав нефти и вывода зачищаемого оборудования из эксплуатации.

Изучение механизма ультразвукового воздействия на поверхности твердых веществ и успешный опыт его использования при обработке скважин, говорят о возможности использования ультразвукового метода для диспергирования донного осадка в резервуарах и очистки внутренней поверхности трубопроводов.

Во **второй главе** представлены результаты исследования силы кавитирующих полей при ультразвуковой обработке асфальтосмолопарафиновых отложений.

С целью определения и установления механизма разрушения АСПО с

помощью кавитации, вызванной ультразвуковыми волнами, был проведен эксперимент с применением высокоскоростной камеры. Задачей эксперимента являлось определение параметров, при которых в жидкости возникают кавитационные поля и как эти поля могут влиять на АСПО.

На рисунке 2 представлена экспериментальная установка. Одной из задач эксперимента являлась визуальная фиксация того, что с помощью кавитации, вызванной в жидкости ультразвуковыми волнами, можно очищать поверхности. Следующей задачей было установление параметров ультразвукового воздействия, при которых происходит очистка каждого образца в различных условиях.

Для фиксации изменений в образце использовалась высокоскоростная камера (скорость съемки до 700 тыс. кадров в секунду). Для обеспечения необходимого разрешения на камеру был установлен микроскоп.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка

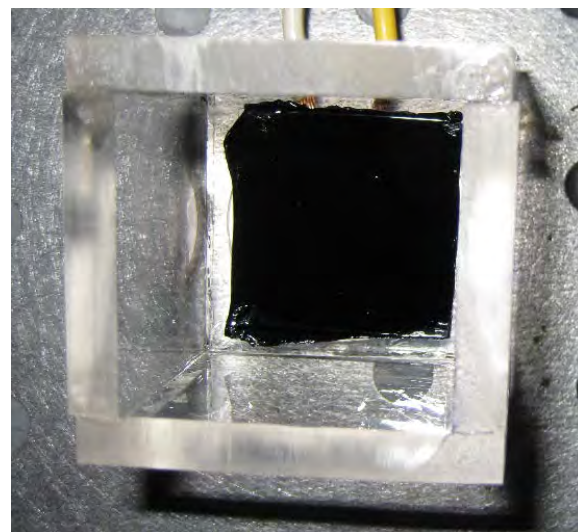


Рисунок 3 – Экспериментальный куб с испытуемым образцом на дне

Воздействие на образец осуществлялось через пьезоэлемент с помощью генератора ультразвуковых волн и усилителя. Нахождение резонансной частоты системы проводилось с использованием осциллографа.

Для проведения эксперимента был изготовлен куб из оргстекла толщиной 5 мм (рисунок 3). Оргстекло было нарезано частями 5 x 5 см и склеено

эпоксидным клеем. Опыты проводились при атмосферном давлении и температуре. В куб помещались испытуемые образцы. Стекла для образцов были предварительно очищены и обезжирены. На них наплавлялся слой испытуемого вещества и в некоторых случаях слой уменьшался с помощью пинкотера. Затем с помощью герметика стекла прикреплялись к нижней поверхности куба с внутренней стороны. Куб устанавливали на штатив перед камерой. После этого куб заполняли дистиллированной водой. С противоположной стороны от камеры устанавливали лампу.

Для создания в жидкости кавитационного эффекта использовался пьезоизлучатель 7BB-20-6L0. Для получения ультразвуковых колебаний в среде необходимо обеспечить работу пьезокристалла в диапазоне частот от 20 кГц. Для преобразования тока использовался ультразвуковой генератор Agilent 33522A фирмы Keysight Technologies (США), имеющий связь по частоте и амплитуде. Данный генератор синхронизировался с работой высокоскоростной камеры фирмы PHOTRON. В ходе эксперимента частота изменялась в промежутке от 20 120 кГц. Для усиления сигнала (амплитуды) использовался усилитель фирмы TandC Power Conversion, Inc.

В дальнейшем эксперименты проводились на определенной резонансной частоте с изменением амплитуды, усилением сигнала и увеличением количества циклов (времени воздействия).

Парафин наплавлялся на стеклянные пластины, которые приклеивались ко дну куба. Было использовано две парафиновые модели. В первой модели парафин наносился простым наплавлением. Для второй модели в процессе застывания с помощью шприца были добавлены пузырьки воздуха. Это было сделано для исследования влияния ультразвука на содержащийся в парафине пузырек воздуха.

Далее для обеих систем была найдена оптимальная резонансная частота. Резонансная частота находилась с помощью осциллографа и гидрофона, опущенного в воду максимально близко к поверхности парафина. Осциллограф синхронизирован с генератором ультразвуковых волн и усилителем. На генераторе устанавливали значение амплитуды 0,1–0,5 В.

На рисунке 4 изображен осциллограф, на котором виден ряд резонансных частот. Из этого ряда для проведения дальнейшего эксперимента был выбран ряд частот 70–75 кГц, т.к. при них наблюдается наибольший резонанс.

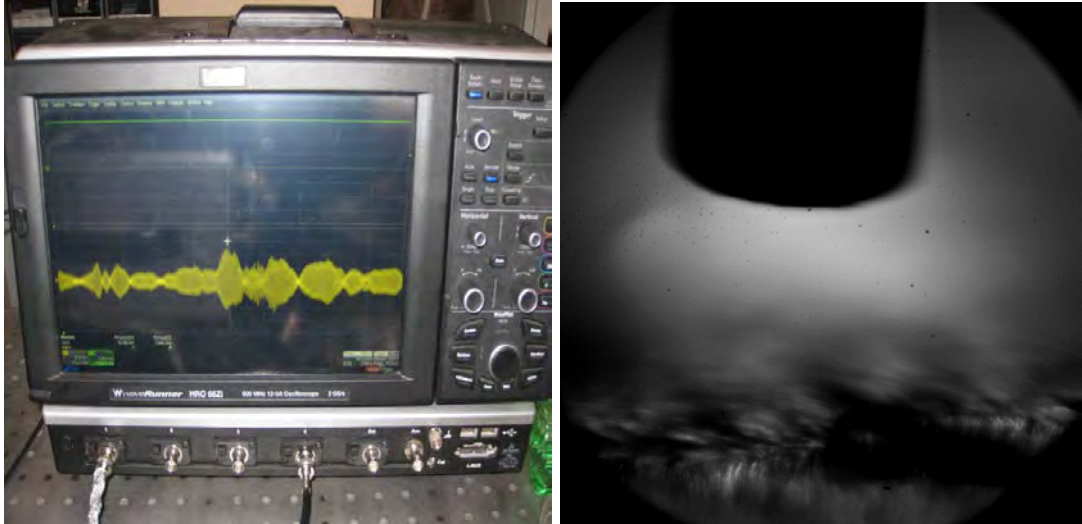


Рисунок 4 – Нахождение рабочей частоты системы

После нахождения оптимальной резонансной частоты осциллограф отключался от генератора, гидрофон вытаскивался из воды. Для наблюдения за поведением кавитирующих пузырьков использовалась высокоскоростная камера FASTCAM SA-X2 с микроскопом в качестве объектива (увеличение 100, разрешение 128 x 8 пикселей при максимальной съемке 1000000 кадров в секунду), также синхронизированная с генератором (рисунок 5).

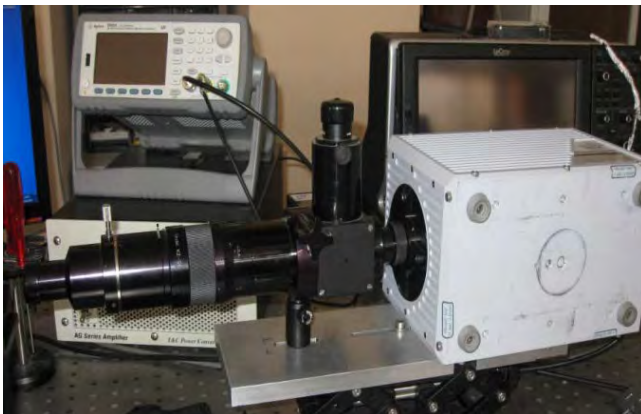


Рисунок 5 – Высокоскоростная камера с микроскопом

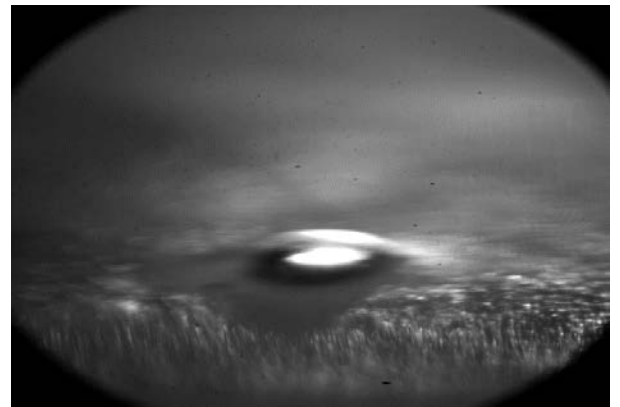


Рисунок 6 – Парафиновый образец с пузырьком воздуха

В эксперименте с образцом с предварительно посаженным пузырьком воздуха под слой парафина (рисунок 6) воздействие осуществлялось периодами по 1 секунде. В области пузырька уже на 2-ой секунде были видны изменения образца. Они обуславливались появлением кавитирующих пузырьков в области выпуклости образца. Также наблюдалось изменение размера пузырька в парафине с конечным всплыванием пузырька, таким образом, ядром чистой полости стало именно то место, где находился пузырек. И именно с этого места и начиналась очистка поверхности с помощью кавитирующих пузырьков.

На данном изображении видны белая область – очищенная и темная – парафин. Так же отчетливо видны пузырьки воздуха больших размеров (рисунок 7).

Воздействуя на образец около 1 мин можно было наблюдать значительные изменения (рисунок 8).

Далее были проведены экспериментальные исследования на промышленном образце АСПО, предоставленном с действующего трубопровода МН ТУ-3 197 км ЛПДС «Черкассы». Ход эксперимента был аналогичен экспериментам, описанным выше. Резонансная частота составила 75 кГц, амплитуда 10 В, время одного воздействия не более 10 с.

До и после проведения эксперимента образец был взвешен для проведения количественного анализа результатов (рисунок 9). Масса АСПО на пластине уменьшилась на 75 %.

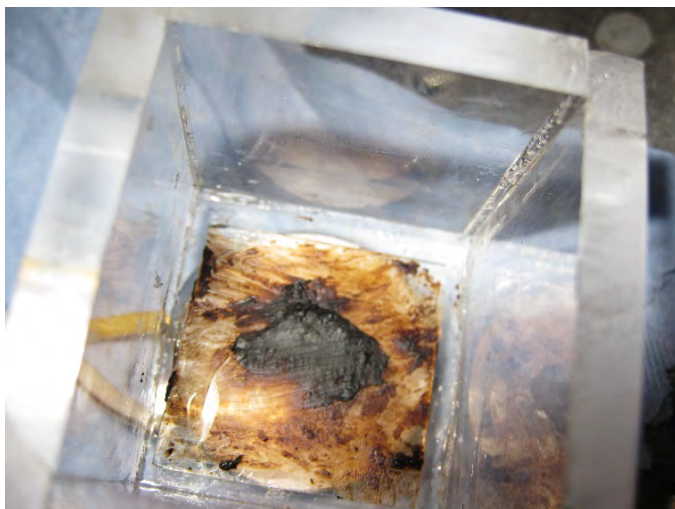


Рисунок 7 – Образец из действующего трубопровода



Рисунок 8 – Образец после испытания

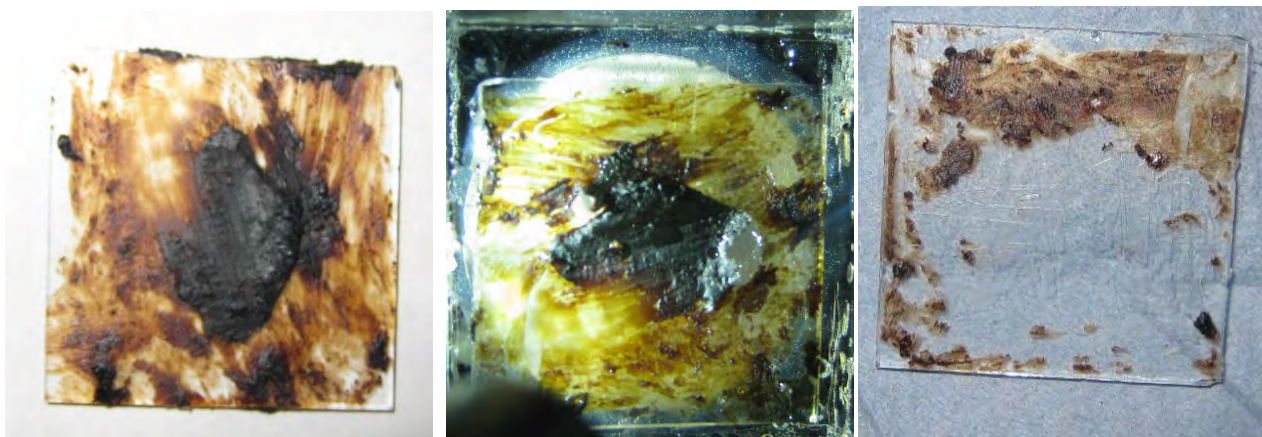


Рисунок 9 – Образцы до, во время и после испытаний

На основе анализа проведенных исследований можно заключить, что ультразвуковые излучатели создают кавитирующие поля, которые значительно влияют на асфальтосмолопарафиновые отложения и вызывают процесс их отделения от поверхностей.

Проводились исследования зависимости амплитуды в точке подключения гидрофона от амплитуды при постоянном усилении сигнала (рисунок 10).

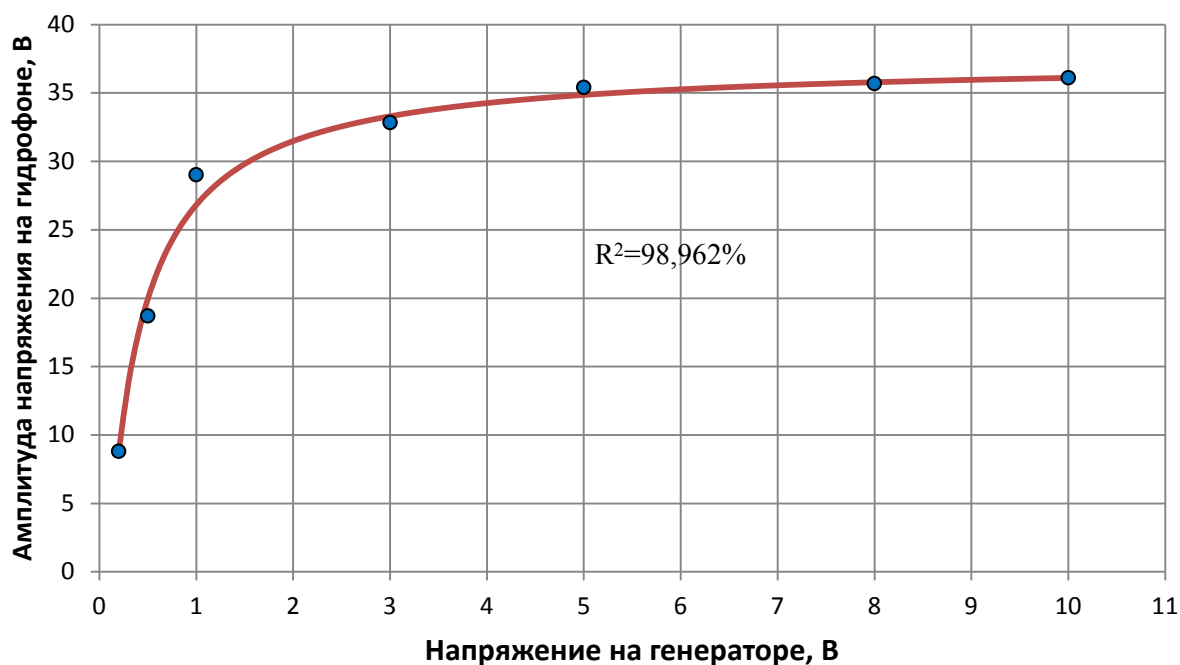


Рисунок 10 – Зависимость амплитуды в точке подключения гидрофона от амплитуды при постоянном усилении сигнала

Установлено, что давление, измеренное на гидрофоне, изменяется нелинейно. Следовательно, и давление кавитирующих пузырьков изменяется так же нелинейно, и существует предельный тепловой эффект при ультразвуковом воздействии, выражающийся в ограниченной тепловой мощности процесса вне зависимости от увеличения входной мощности генератора колебаний.

Таким образом, при увеличении входной мощности генератора выше 30 % от его максимума не происходит явного сокращения времени достижения необходимой температуры. Следовательно, в целях оптимизации процесса ультразвуковой обработки имеет смысл проведение предварительных исследований свойств образцов АСПО и нефти, на основании которых следует производить точную калибровку и настройку преобразователей.

В третьей главе проводились исследования теплового эффекта при ультразвуковой обработке асфальтосмолистых и парафиновых отложений в объеме нефти.

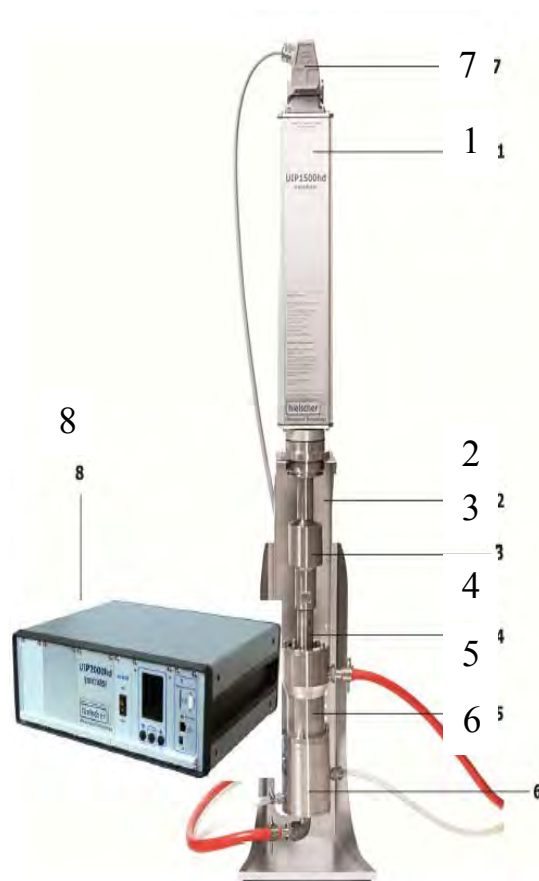
Целью экспериментов являлось определение величины влияния теплового поля при ультразвуковой обработке отложений в объеме нефти.

Ультразвуковой гомогенизатор создает продольные механические колебания с частотой 20 кГц посредством электрической стимуляции (обратный пьезоэффект). Входная мощность может быть задана в диапазоне от 20 % до 100 % от максимальной.

Сонотрод, установленный на консоль, увеличивает колебания и передает их в среду через всю свою фронтальную поверхность. Ультразвуковые колебания на сонотроде с механической амплитудой до 100 мкм создают в обрабатываемой среде кавитацию. Временные высокие давления и температуры, генерируемые во время этого процесса, могут вызывать реакции, благоприятные для необходимого применения.

Исследовалось время достижения температуры плавления парафина при различных входных мощностях и постоянной амплитуде. Стеклоянная колба заполнялась парафином, который был предварительно расплавлен, и далее было выждено время для его обратного превращения в кристаллическую форму. После

этого соноотрод ультразвукового гомогенизатора UIP2000hdT был помещен в центр затвердевшего образования парафина, как показано на рисунке 11.



- 1 – преобразователь; 2 – стенд ST2; 3 – усилитель (опционально);
 4 – соноотрод; 5 – расширение проточной ячейки; 6 – проточная ячейка;
 7 – вилка с кабелем к генератору; 8 – генератор

Рисунок 11 – Соноотрод, установленный в парафин

Термометр был установлен на расстоянии 0,04 м от соноотрода. Возможности генератора позволяли изменять мощность в диапазоне 10–100 % от максимальной мощности (2 кВт) с шагом 10 %.

Результаты эксперимента по определению времени достижения заданной

температуры представлены графически на рисунке 12.

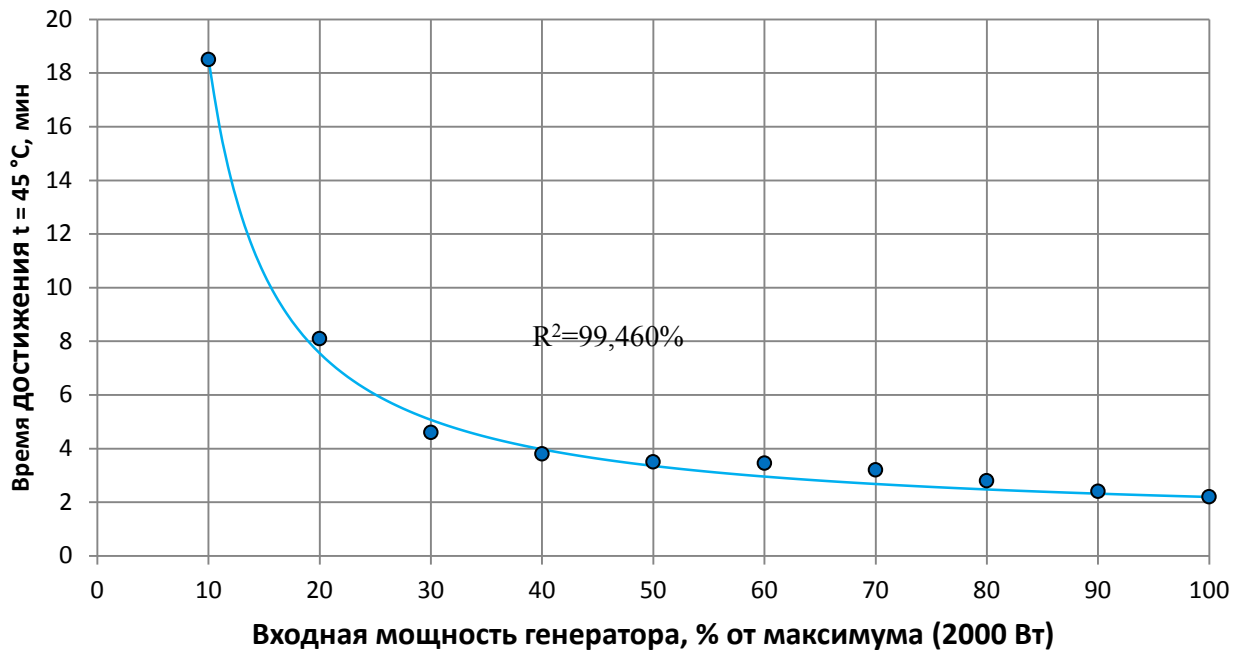


Рисунок 12 – Зависимость времени достижения температуры $t = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ от входной мощности генератора

Четвертая глава посвящена повышению эффективности удаления асфальтосмолистых и парафиновых отложений в резервуарах магистральных нефтепроводов. Рассмотрены методы удаления отложений нефти без остановки работы резервуаров. Установлено, что, несмотря на современные возможности по мониторингу процесса накопления отложений нефти, существующие технологии не позволяют обеспечить эффективное удаление отложений из резервуаров.

В том числе это происходит вследствие сильного влияния свойств отложений на эффективность удаления отложений и выбора оптимального метода очистки. Универсального и эффективного метода очистки на данный момент не существует, однако им в перспективе может стать применение ультразвукового воздействия.

Была произведена оценка очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений различных емкостей на объектах транспорта и хранения нефти при помощи ультразвуковых излучателей.

Экспериментально выявлено, что на асфальтосмолистые и парафиновые отложения влияют одновременно два эффекта: тепловой эффект и эффект от ультразвукового воздействия. Таким образом, была разработана математическая модель, учитывающая оба эффекта:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = f \left(\frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \right).$$

Здесь T – температура асфальтосмолистых и парафиновых отложений в исследуемой емкости; r – координата в сферических координатах; ρ – плотность асфальтосмолистых и парафиновых отложений; c_v – изохорная теплоемкость асфальтосмолистых и парафиновых отложений; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент затухания ультразвуковых волн в асфальтосмолистых и парафиновых отложениях; χ – коэффициент, отражающий свойства среды и параметры ультразвуковых волн на тепловое воздействие.

Представив данную формулу в регрессионной форме второго порядка, после соответствующего анализа получаем следующую модель распространения тепла под действием ультразвукового воздействия:

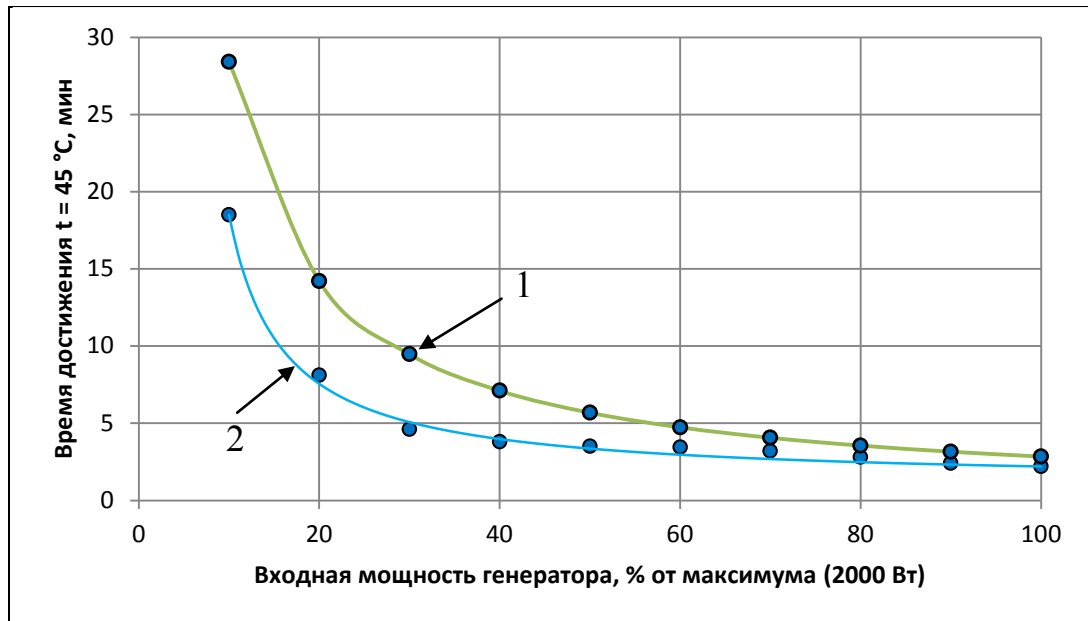
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(1 + \chi_0 \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \right) \frac{\lambda}{\rho c_v} \left(\frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right).$$

Здесь χ_0 – коэффициент, отражающий свойства среды и параметры ультразвуковых волн на тепловое воздействие.

Произведем оценку времени очистки при отсутствии ультразвуковых колебаний. Время разжижения от теплового источника такой же мощности, что ультразвуковая установка (Рисунок 13).

Анализ рисунка 13 показывает, что применение ультразвукового воздействия позволило ускорить процесс очистки на 54 %.

Произведена оценка использования ультразвукового воздействия одного излучателя для очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений в разных емкостях (таблица 1).



1 – при воздействии только теплового источника (расчетные значения);

2 – при воздействии только ультразвукового излучения (экспериментальные значения)

Рисунок 13 – Сравнение применения ультразвука и только теплового воздействия по данным расчетных и экспериментальных исследований

Таблица 1 – Оценка использования ультразвукового воздействия для очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений в разных емкостях (для одного излучателя)

Емкость сосуда с асфальтосмолистыми и парафиновыми отложениями V, м ³	Повышение эффективности очистки за счет использования ультразвуковых колебаний, %		Примечание
	ультразвуковая установка UIP2000hd	ультразвуковая установка Telsonic ES-20-75	
0,001521	54	254,7	Условие эксперимента
0,01	28,8	136,0	–
0,1	13,4	63,1	–
0,2	10,6	50,1	Стандартная бочка для нефти
0,621	10,0	47,1	–
1	6,21	29,3	–
3,420	2,12	10,0	–
85	1,41	6,66	Вагон-цистерна для перевозки нефти
1000	0,621	2,929	PBC-1000
5000	0,363	1,713	PBC-5000
10000	0,288	1,360	PBC-10000
20000	0,229	1,079	PBC-20000

Таким образом, видно, что применение одиночного ультразвукового воздействия эффективно для очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений в емкостях малого объема. Применение ультразвуковой установки UIP2000hd эффективно для очистки емкостей объемом до 100–200 л. Ультразвуковую установку Telsonic ES-20-75 имеет смысл применять для очистки емкостей объемами до 40 м³.

Для очистки более крупных емкостей, таких как вагон-цистерна для перевозки нефти и нефтепродуктов, резервуаров для хранения нефти, рекомендуется использовать набор ультразвуковых излучателей, расположенных друг от друга на расстоянии 0,5–1,0 м (исходя из условия дополнительной эффективности применения ультразвука не менее 10 %).

Установлено, что радиус эффективной работы ультразвуковой установки UIP2000hd составляет 0,62 м, а для ультразвуковой установки Telsonic ES-20-75 – 3,42 м.

Проведен анализ по определению количества точек установки ультразвуковых излучателей для очистки днища различных резервуаров (таблица 2). При большом количестве точек ультразвуковые излучатели можно перемещать.

Таблица 2 – Расчет количества точек установки ультразвуковых излучателей для очистки днища различных резервуаров от асфальтосмолистых и парафиновых отложений

Тип емкости	Объем емкости, м ³	Площадь очищаемой поверхности, м ²	Необходимое количество точек установки ультразвуковых излучателей	
			ультразвуковая установка UIP2000hd	ультразвуковая установка Telsonic ES-20-75
Бочка для нефти	0,2	0,371	1	1
Вагон-цистерна типа 15-144	62,8	33,3	50	5
РВС-1000	1000	85,4	128	6
РВС-5000	5000	408	613	20
РВС-10000	10000	918	1379	45
РВС-20000	20000	1250	1877	62

На основе проведенных расчетов определены оптимальные точки установки ультразвуковых излучателей на вагоне-цистерне типа 15-144, резервуаров типа РВС-1000, РВС-5000, РВС-10000 и РВС-20000.

Выполнен расчет параметров обработки парафиновых отложений нефти в резервуаре РВС-20000 для всего днища (таблица 3).

Таблица 3 – Расчет параметров обработки донного осадка резервуара РВС-20000

Количество работающих излучателей, шт.	Время очистки емкости, ч	Потребляемая мощность резонаторов, кВт	Тепловая мощность процесса, кВт
1	74,0	2	2,55
5	14,8	10	12,75
10	7,4	20	25,50
15	4,9	30	38,25
20	3,7	40	51,00
25	3,0	50	63,75
30	2,5	60	76,50

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ существующих методов по предотвращению и удалению отложений нефти в резервуарах показал преимущества ультразвуковой обработки для размягчения и диспергирования плотных трудноудаляемых отложений, которые заключаются в отсутствии прямого термического воздействия, влияния на состав и свойства нефти, необходимости последующей очистки и утилизации жидкостей.

2 Установлено, что ультразвуковая очистка поверхности от отложений нефти в значительной мере происходит из-за проявления кавитационных полей под действием резонансных ультразвуковых колебаний, при этом максимальная амплитуда колебаний асимптотически стремится к определенному значению, и равному 40В для условий эксперимента.

3 Экспериментально установлено наличие синергетического эффекта кавитирующего и теплового полей, позволяющего производить диспергирование донного осадка с большей скоростью по сравнению с только тепловым воздействием той же мощности.

4 Разработанная математическая модель процесса ультразвуковой обработки нефти, учитывающая косвенный тепловой эффект резонаторов, позволила оценить среднюю величину увеличения тепловой мощности процесса – в 1,5 раза по сравнению с обычным нагревом, и определить радиус эффективного действия ультразвуковых излучателей, лежащий в пределах от 0,5 до 1,0 м в зависимости от типа резонатора.

Содержание работы опубликовано в 7 научных трудах, в том числе:

- в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus

1. Hofstatter, H. Application of Ultrasound for the Destruction of Resin-Paraffin Deposits in Pipeline Transportation of Oil / H. Hofstatter, M. Pavlov, B. Mastobaev // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2014. – № 4. – С. 35–39.

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях в соответствии с требованиями ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

2. Хофштаттер, Х. Применение ультразвука для разрушения асфальтосмолопарафиновых отложений в трубопроводе при транспортировке нефти / Х. Хофштаттер, М. Павлов, Б. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 6–9.

3. Павлов, М. В. Применение ультразвука для удаления асфальтосмолистых парафиновых отложений в резервуарах для хранения нефти / М. В. Павлов, Б. Н. Мастобаев, Х. Хофштаттер // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 6. – С. 58–62.

4. Безымянников, Т. И. Моделирование применения ультразвука для очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений на объектах транспорта и хранения нефти / Т. И. Безымянников, М. В. Павлов, А. Р. Валеев, Б. Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018. – № 3. – С. 22–26.

- в материалах различных конференций и семинаров:

5. Павлов, М. В. Возможности исследования процесса удаления АСПО в трубопроводах с применением ультразвука на экспериментальной установке / М. В. Павлов, Б. Н. Мастобаев, Х. Хофштаттер // Трубопроводный транспорт – 2015 : матер. X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа, 2015. – С. 163.

6. Павлов, М. В. Экспериментальные исследования по применению ультразвука для разрушения АСПО при трубопроводном транспорте нефти / М. В. Павлов // Трубопроводный транспорт – 2016 : матер. XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа, 2016. – С. 191–193.

7. Колчин, А. В. Разработка методов высокочастотного ультразвукового удаления АСПО в нефтепроводах Республики Башкортостан / А. В. Колчин, М. В. Павлов, Х. Хофштаттер // Трубопроводный транспорт – 2017 : матер. XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. – Уфа, 2017. – С. 111–113.