

На правах рукописи



Суслов Антон Владимирович

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В
НЕФТЕПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЙ**

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Самара – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информационно-измерительная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Научный руководитель: **Ярославкина Екатерина Евгеньевна**
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический университет»,
г. Самара

Официальные оппоненты: **Трофимов Алексей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Информационно-измерительная техника и метрология»,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,
г. Пенза

Свиристилева Александра Владимировна
кандидат технических наук, доцент, исполнительный
директор АНО «Международный центр компетенций в
горнотехническом образовании» под эгидой ЮНЕСКО,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Уфимский
государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа.

Защита состоится «23» июня 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного
совета 24.2.377.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус,
аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного
технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на
официальном сайте диссертационного совета по адресу: <https://d24237704.samgtu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату просим высылать в двух экземплярах, заверенных
печатью, по адресу: 443001, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д.244,
Самарский государственный технический университет, главный корпус, ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.377.04: тел. (846) 337-05-45, e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.2.377.04
кандидат технических наук, доцент



Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Процесс добычи нефти и нефтепродуктов осложнен рядом проблем, одной из которых является осаждение асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренних стенках технологического оборудования. В настоящее время, когда большая часть месторождений страны переходит в позднюю стадию своей разработки, вопрос о совершенствовании технологических процессов добычи и транспортировки нефти стоит особенно остро.

АСПО сужают проходное сечение трубопроводов, нарушая оптимальный режим работы оборудования, оседают на днищах резервуаров, уменьшая полезный объем хранения нефти и нефтепродуктов, а также приводят к осложнениям в работе насосного оборудования, в том числе и к авариям на производстве, например, к обрывам штанг штанговых скважинных насосных установок.

Каждый год нефтяные компании несут экономические убытки, связанные с очисткой трубопроводов и оборудования от отложений. В связи с этим актуальной является задача разработки информационно-измерительной системы (ИИС) определения толщины АСПО (ОТО), позволяющей получать информацию о состоянии отложений на внутренней стенке нефтепроводов в режиме реального времени, с улучшенными метрологическими характеристиками. ИИС ОТО позволит спрогнозировать график очистных мероприятий и сократит экономические расходы, а также предупредит возможные аварии на производстве.

Степень разработанности темы исследования

Проблема АСПО не нова для нефтяной отрасли. Механизмы образования АСПО и способы борьбы с ними, а также вопрос определения толщины отложений рассматривались многими зарубежными и отечественными авторами. В России занимались исследованиями по данной теме следующие ученые: Рогачев М.К., Тронов В.П., Денисламов И.З., Чеботников В.А., Мастобаев Б.Н., Табет Н.К.А., Фетисов В.С., Илюшин П.Ю., Валеев А.Р., Бадиков Ф.И., Ахмедов Г.А., Коптева А.В. Из зарубежных авторов научных работ в этой области можно выделить Hofstatter H., Wang W., Sousa A.L., Theyab M.A., Chen X.T., Ito S., Abdul-Majid S., Alnaimat F., Kim J., Chen Z., Tian H., Gunarathne G.P.P., Rommetveit T. Существуют различные запатентованные методы и способы определения толщины отложений. Уделялось внимание вопросам разработки ИИС определения толщины отложений на основе различных физических явлений.

Предложенный Валеевым А.Р. и Гирфановой Д.Ю. метод прямого измерения толщины отложений путем введения измерительного устройства внутрь трубопровода, требует большого парка оборудования под разные типоразмеры трубопроводов. Большинство решений предлагают измерение толщины отложений, используя косвенные методы, основанные на различных физических явлениях и их взаимосвязи с толщиной отложений. Так, толщину отложений предложено определять через измерение падения давления, вследствие сужения сечения трубопровода в результате отложения АСПО. К сожалению, данный подход не эффективен при малых толщинах отложений.

Есть решения, предлагающие измерение скорости потока введенной в трубопровод жидкости или путем измерения ее объема. Недостаток такого решения – необходимость остановки процесса транспортировки нефти и очистки трубопровода от продукта. Перспективными являются методы, использующие в своей основе теплопроводность и теплопередачу, например, метод, предложенный Фетисовым В.С. и Табетом Н.К.А. Из ограничений метода можно выделить сложность реализации аппаратной части непосредственно на самом трубопроводе. Одними из точных методов является метод с использованием ионизирующей радиации, предложенный Коптевой А.В. Из недостатков такого подхода – опасность ионизирующего излучения для здоровья персонала.

Таким образом, несмотря на достижения в предложенных методах и системах измерения, по-прежнему существует необходимость разработки новой ИИС определения толщины отложений. Перспективным является разработка ИИС на основе акустических

методов неразрушающего контроля. Данные методы контроля являются неразрушающими, обладают высокой точностью и могут быть реализованы на широком диапазоне диаметров и толщины объекта контроля.

Цель диссертационной работы – разработка информационно-измерительной системы с широкими функциональными возможностями для определения толщины отложений на внутренней поверхности нефтепроводов (ИИС ОТО) на основе акустического метода неразрушающего контроля, позволяющей уменьшить затраты на очистку нефтепроводов от асфальтосмолопарафиновых отложений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1) изучены причины образования асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренних стенках трубопроводов;

2) проведен анализ существующих методов и предложенных на их основе систем измерения толщины асфальтосмолопарафиновых отложений;

3) разработан акустический метод измерения толщины асфальтосмолопарафиновых отложений на основе акустических методов неразрушающего контроля;

4) разработана ИИС определения толщины отложений на основе акустического метода неразрушающего контроля;

5) разработана метрологическая модель измерительных каналов ИИС определения толщины отложений;

6) разработана методика калибровки, настройки и проведения измерений толщины асфальтосмолопарафиновых отложений с использованием ИИС определения толщины отложений;

7) проведено экспериментальное исследование и внедрение ИИС определения толщины отложений.

Объект исследования – информационно-измерительная система определения толщины отложений.

Предмет исследования – методы, технические средства и структуры информационно-измерительных систем, а также способы и алгоритмы измерения толщины отложений.

Научная новизна диссертационной работы

1) Разработан акустический метод измерения толщины отложений на внутренней стенке трубопровода, впервые использующий функциональную связь параметров собственных колебаний стенки трубопровода от толщины отложений, который позволяет расширить функциональные возможности ИИС в решении задачи измерения толщины АСПО, за счет снижения дополнительных погрешностей из-за влияния сторонних факторов, расширения диапазона измерений и снижения затрат на реализацию ИИС (п.4).

2) Разработана методика калибровки ИИС ОТО, отличающаяся контролем влияния типоразмеров и физико-химических свойств трубопровода и свойств АСПО на результат измерения, что позволяет снизить погрешности измерений (п.4).

3) Разработана ИИС ОТО на основе акустического метода измерений толщины отложений, обеспечивающая контроль параметров толщины АСПО в автоматическом режиме, что позволяет сократить затраты на проведение очистных работ за счет оптимизации интервалов проведения очистных мероприятий (п.3).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в определении корреляционно-регрессионных моделей взаимосвязи между параметрами акустического сигнала (частотой, амплитудой, энергией, длительностью) и толщиной АСПО; в создании акустического метода измерения толщины отложений на внутренней стенке трубопровода, который позволил расширить функциональные возможности ИИС в решении задачи измерения толщины АСПО.

Практическая значимость работы заключается в: разработке ИИС ОТО на трубопроводах для транспортировки нефти и нефтепродуктов, позволяющей сократить затраты на проведение очистных мероприятий; методике калибровки и проведения измерений толщины АСПО с

использованием ИИС ОТО; программно-аппаратных средствах обработки измерительной информации.

Методы исследования

В работе использованы методы математического анализа, статистических исследований, методы математического и численного моделирования, натурный эксперимент, использованы отдельные разделы и положения теории волновых процессов, акустических колебаний, вибрации в технике, а также методы неразрушающего контроля.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Акустический метод измерения толщины отложений на внутренней стенке нефтепроводов, основанный на взаимосвязи параметров акустических колебаний стенки трубопровода и толщины отложений, позволяющий расширить функциональные возможности ИИС в решении задачи измерения толщины АСПО.

2) Структурная, функциональная схема и алгоритмическое обеспечение ИИС определения толщины отложений с использованием разработанного акустического метода неразрушающего контроля.

3) Методика калибровки и проведения измерений с применением ИИС ОТО.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационное исследование соответствует научной специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы по следующим пунктам:

п.3 «Математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительных и управляющих систем»;

п. 4 «Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования».

Достоверность результатов исследования

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертационной работе, обеспечивается корректным использованием математических методов, использованием в теоретических построениях общепризнанных законов, соблюдением действующих стандартов. Теоретические положения подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Полученные результаты не противоречат известным положениям в данной области исследований.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: 6-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» 2021 г.; Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии» 2022 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», 2022 г.

Методика оценки толщины отложений прошла апробацию в рамках гранта Инновационного фонда Самарской области №1/35-РЖД-СП/2024 от 13.08.2024 г. «Комплексная система мониторинга водопропускных сооружений».

Внедрение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли применение при исследовании стенда «Моделирование процесса выпадения асфальтосмолопарафиновых веществ на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб» в ООО «Научно-производственный центр «Самара» г. Самара. Разработанная ИИС ОТО прошла апробацию в АО «Средневожский научно-исследовательский институт по нефтепереработке» г. Новокуйбышевск.

Разработанные методики прогнозирования АСПО и оценки погрешностей внедрены в учебный процесс «Самарский государственный технический университет» при подготовке бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение» и магистров по направлению 12.04.01

«Приборостроение» в образовательной программе «Неразрушающий контроль, техническая диагностика объектов нефтегазовой отрасли».

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 11 работ, из них: 4 публикации в рецензируемых научных журналах, 2 патента на изобретения, 1 свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Личный вклад автора

Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. Постановка задач работы и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно проводились теоретические исследования, математическое и численное моделирование, разработка схем и алгоритма работы ИИС ОТО, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментальных исследований, разработка методики калибровки и проведения измерений.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 166 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 105 наименований, содержит 74 рисунка, 22 таблицы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются основные цели и задачи, характеризуется научная новизна, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены механизмы образования АСПО в технологическом оборудовании. Проведен анализ существующих методов и систем измерения толщины АСПО на внутренней стенке трубопроводов, рассмотрены их преимущества и недостатки.

Методы измерения толщины АСПО можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Прямые методы реализуются путем введения измерительного оборудования непосредственно в трубопровод. Из преимуществ данных методов можно выделить точность измерения, из недостатков – необходимость иметь парк измерительных снарядов и наличие доступа вовнутрь трубопровода, что не всегда реализуемо.

Косвенные измерения реализуются посредством различных физических принципов и их взаимосвязи с толщиной АСПО. В настоящее время предложены методы, основанные на измерении давления, электрического сопротивления, тепловых процессов, методы с использованием ионизирующего излучения и др. Анализ показал, что существующие методы измерения толщины АСПО обладают рядом недостатков, затрудняющих их повсеместное применение: в одних случаях требуется нарушение целостности объекта контроля, в других используются сложные аппаратные и математические комплексы, некоторые методы опасны для здоровья персонала.

Сформулированы требования к методу измерения толщины отложений: метод должен быть неразрушающим, т.е. не нарушать целостность объекта контроля и не приводить к ухудшению его эксплуатационной пригодности; метод должен быть независимым от диаметра и толщины исследуемого трубопровода; метод должен иметь возможность реализации при ограниченном доступе к объекту контроля; метод должен обеспечивать точность измерений с погрешностью в диапазоне не более 10%; метод должен быть безопасен для обслуживающего персонала; метод должен иметь простые алгоритмы обработки и легко реализуем на практике.

Во второй главе проведен анализ и экспериментальные исследования с целью возможности применения существующих акустических методов для измерения толщины АСПО. Анализ литературы показал, что в настоящее время, для измерения толщины отложений предложено 3 схемы с использованием направленной акустической волны: метод прохождения акустической волны; метод отражения акустической волны; анализ затухания акустической волны, отраженной от границы раздела сред. Проведены экспериментальные исследования предложенных методов измерения.

Схема и результаты первого эксперимента показаны на Рисунке 1. При отсутствии отложений фиксируется сигнал прошедший через стенки трубы и среду, при наличии отложений зафиксировать сигнал не удалось. На Рисунке 2 представлены схема и результаты эксперимента с методом отражения. Получен сигнал отражения от АСПО только при предельном усилении дефектоскопа, при котором шум и помехи имеют усиление больше полезного сигнала.

Коэффициент затухания направленной продольной акустической волны в среде зависит от множества факторов. Представим его следующим выражением:

$$\delta_l = k_1 f + k_2 D^3 f^4, \quad (1)$$

где f – частота звука; D – размер зернистости материала; k_1, k_2 – коэффициенты, зависящие от материала.

По результатам экспериментов установлено, что вследствие физико-химического состава АСПО, которое дополнено различными примесями (песок, ржавчина и т.п.), происходит быстрое поглощение и рассеяние акустической волны. Этот процесс ограничивает указанные акустические методы для применения в известных схемах.

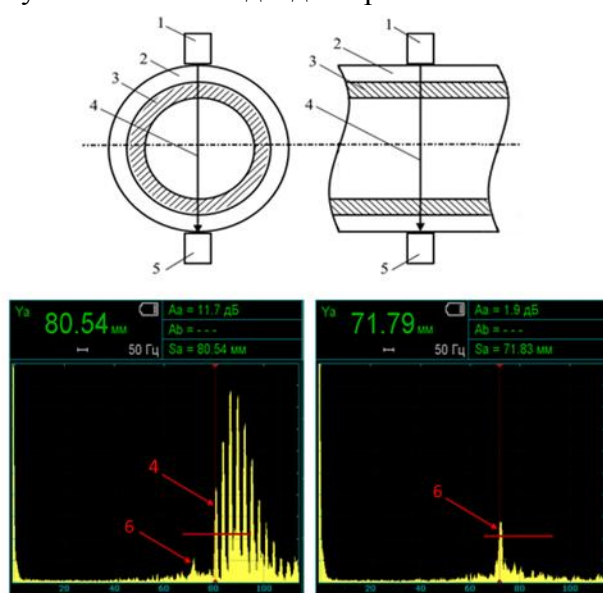


Рисунок 1 – Метод прохождения
Обозначения: 1 – излучатель; 2 – стенка трубы;
3 – АСПО, 4 – направление прямой акустической
волны; 5 – приемник; 6 – сигнал волны, идущей
вдоль стенки

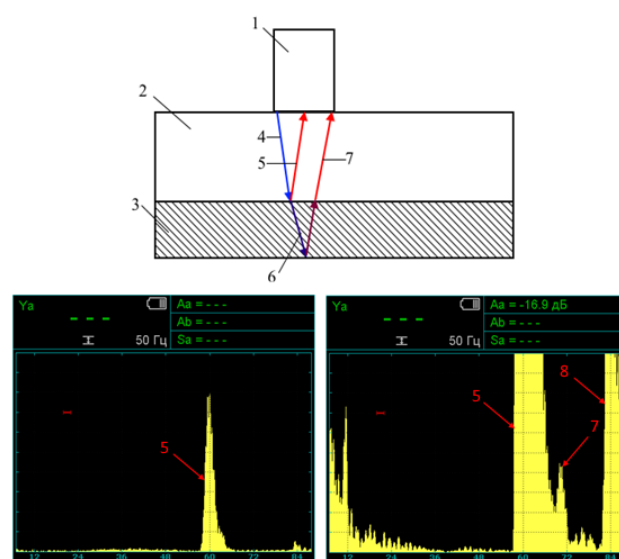


Рисунок 2 – Метод отражения
Обозначения: 1 – излучатель и приемник; 2 – образец из
стали; 3 – АСПО, 4 – прямая волна; 5 – отраженная волна
в металле; 6 – прямая волна в АСПО;
7 – отраженная волна из АСПО; 8 – помеха

На Рисунке 3 показана схема исследования затухания направленной волны. Различий в затухании при отражении от границы раздела сред с разной толщиной АСПО не обнаружено. При нормальном падении волны коэффициент отражения по давлению определяется формулой:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)}, \quad (2)$$

где Z_1, Z_2 – акустические сопротивления первой и второй среды соответственно.

Акустическое сопротивление среды определяется ее плотностью ρ и скоростью звука в ней C : $z = \rho C$. Толщина слоя второй среды не влияет на прохождение прямой и, соответственно, затухание отраженной волны. На Рисунке 4 показана схема дополнительного исследования ультразвуковых волн в АСПО. При толщине 7 мм затухание становится критическим.

Анализ существующих методов и решений измерения толщины отложений и проведенные экспериментальные исследования, приводят к выводу о необходимости поиска нового подхода к измерению толщины АСПО. Выдвинуто предположение о наличии взаимосвязи между толщиной АСПО и переменными, характеризующими колебания стенки трубопровода. Предложена следующая схема измерения толщины АСПО: на участке

трубопровода возбуждаются свободные колебания стенки, которые регистрируются, и проводится их последующий анализ. В частности, наличие АСПО может влиять на такие параметры колебаний, как частота, амплитуда, энергия и длительность.

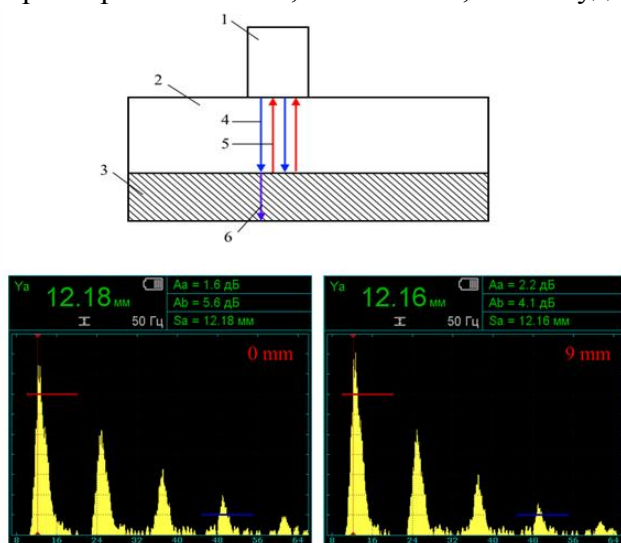


Рисунок 3 – Измерение затухания
Обозначения: 1 – излучатель и приемник;
2 – образец из стали; 3 – АСПО; 4 – прямая волна; 5 – отраженная волна в металле; 6 – звуковая волна прошедшая в АСПО

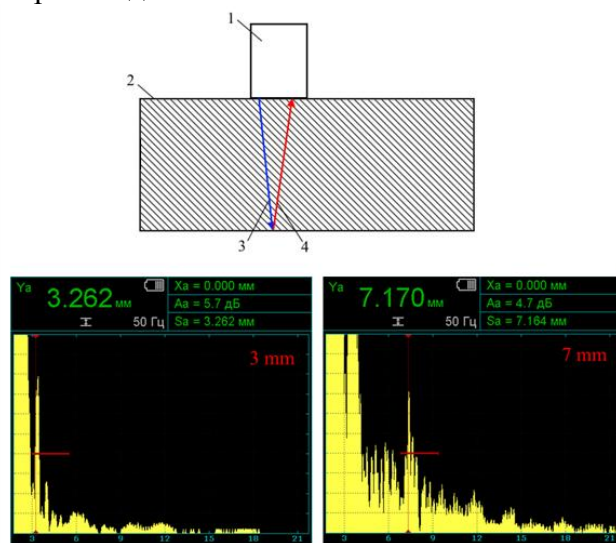


Рисунок 4 – Исследование АСПО
Обозначения: 1 – излучатель и приемник;
2 – АСПО; 3 – прямая волна; 4 – отраженная волна

В третьей главе описываются численное моделирование и экспериментальные исследования, направленные на поиск и описание взаимосвязи параметров колебаний стенки трубопровода от толщины АСПО.

При внешнем воздействии на трубопровод силой F , колебание возмущенного участка трубопровода будет являться суммарным откликом стенки трубопровода и отложений, как единой колебательной системы. Влияние толщины отложений на колебательную систему будет выражаться в увеличении суммарной массы системы и в изменении ее жесткости. Наличие отложений с одной стороны увеличивает общую массу системы, что должно приводить к уменьшению резонансной частоты и уменьшению длительности колебаний такой системы, с другой стороны, слой отложений увеличивает демпфирование системы, уменьшая длительность колебаний. Поскольку масса пропорциональна толщине слоя, исследуя параметры колебаний системы можно определить толщину слоя АСПО.

Для проверки гипотезы проведено моделирование упрощенной модели объекта исследования как участка трубопровода в виде прямоугольной пластины. Моделирование было направлено на изучение влияния толщины АСПО на резонансную частоту свободных колебаний. Дифференциальное уравнение свободных колебаний изотропной пластины постоянной толщины имеет вид:

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

где w – прогиб пластины; m – массовая плотность пластины; D – цилиндрическая жёсткость пластины.

Массовая плотность определяется формулой:

$$m = \rho h, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала; h – толщина слоя материала.

Жесткость системы D зависит от упругих свойств материала и его толщины:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; h – толщина слоя материала.

Аналитическое решение уравнения (3) относительно частоты для квадратной пластины со стороной a с жесткой заделкой по краям имеет вид:

$$\omega = \frac{2\pi^2(r + \frac{1}{3})^2}{a^2} \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где r – количество узловых точек вдоль стороны a .

При наличии на пластине АСПО представим жесткость системы, как сумму жесткостей отдельных ее составляющих. При сохранении граничных условий, аналитическое решение примет вид:

$$\omega = \frac{2\pi^2(r + \frac{1}{3})^2}{a^2} \left(\frac{D_M + D_0}{\rho_M h_M + \rho_0 h_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где D_M и D_0 – жесткость металлической пластины и жесткость парафиновых отложений; ρ_M и ρ_0 – плотность пластины и плотность отложений; h_M и h_0 – толщина пластины и толщина отложений соответственно.

Решение показало, что наличие отложений приводит к смещению резонансной частоты в сторону ее уменьшения.

Проведен модальный анализ колебаний отрезка трубы, с отложениями и без, а также гармонический анализ отклика на кратковременное внешнее воздействие с заданной силой F . Результаты численного моделирования показаны на Рисунке 5.

Установлено, что наличие отложений приводит к смещению резонансной частоты (6985 Гц без отложений, 6612 Гц с отложениями 6 мм), уменьшению амплитуды отклика ($6,088 \cdot 10^{-6}$ мм против $5,752 \cdot 10^{-6}$ мм) и к увеличению коэффициента демпфирования ($81,236 \cdot 10^{-3}$ против $81,365 \cdot 10^{-6}$).

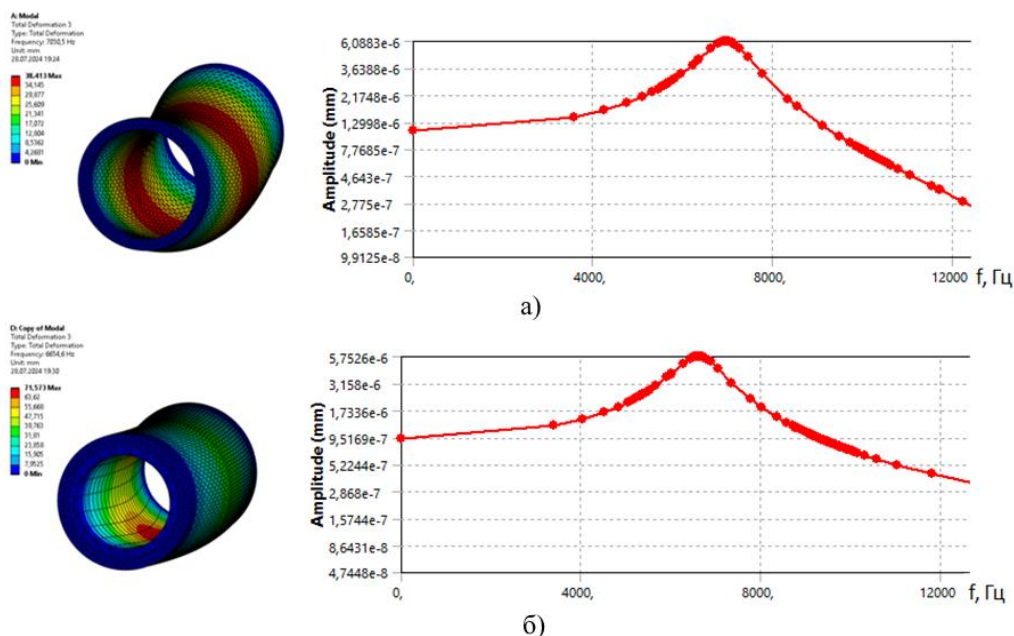


Рисунок 5 – Результаты моделирования трубопровода
а – труба без отложений; б – труба с отложениями

Для дальнейших исследований собрана лабораторная установка (Рисунок 6), обеспечивающая возбуждение колебаний заданной амплитуды, периода и частоты следования.

Проведены равноточные измерения на участке трубы без отложений и с АСПО различной толщины. Обработка результатов проводилась с помощью разработанного программного обеспечения. Алгоритм работы ПО показан на Рисунке 7.

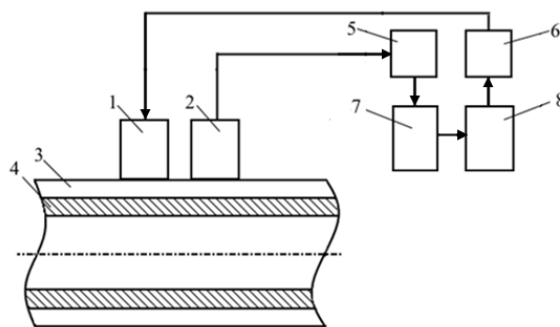


Рисунок 6 – Схема ИК

Обозначение: 1 – возбудитель колебаний; 2 – приемник колебаний; 3 – стенка трубы; 4 – АСПО; 5 – усилитель; 6 – генератор; 7 – АЦП; 8 – микроконтроллер

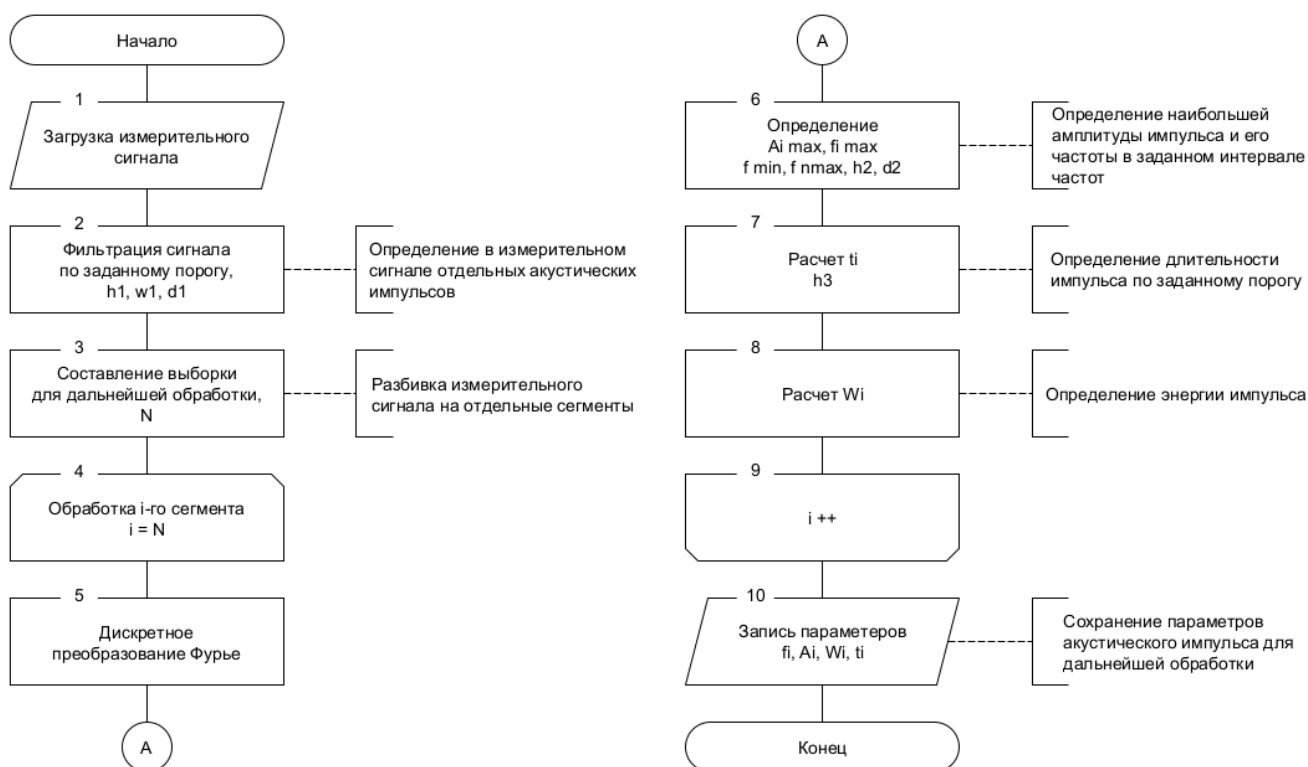


Рисунок 7 – Алгоритм работы программы

На Рисунках 8, 9 представлены примеры обработки сигналов на трубопроводе с отложениями и без, полученные с помощью разработанного ПО.

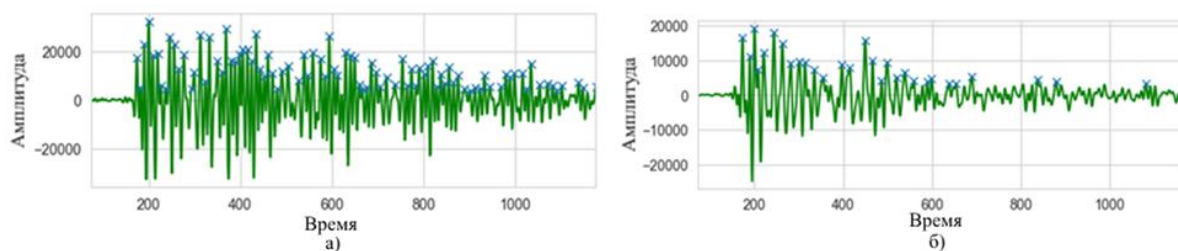


Рисунок 8 – Временные диаграммы
а – труба без отложений; б – труба с отложениями

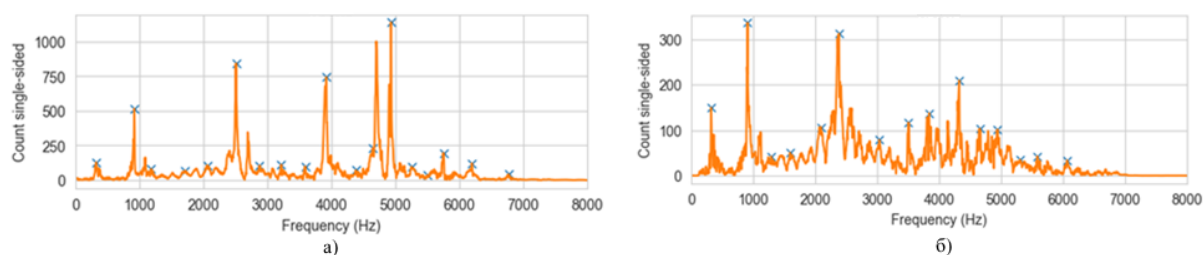


Рисунок 9 – Спектральные характеристики сигналов
а – труба без отложений; б – труба с отложениями

Анализ графиков показал, что наличие отложений приводит к смещению резонансных частот, уменьшению амплитуды и длительности сигнала. На этом основании для дальнейшего анализа выбраны следующие параметры акустического сигнала: частота свободных колебаний стенки трубопровода; амплитуда колебаний; энергия сигнала; длительность сигнала. Для установления зависимости между толщиной отложений и указанными параметрами проведен корреляционно-регрессионный анализ. Результаты анализа показаны в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты корреляционно-регрессионного анализа

Исследуемый параметр	Вид регрессионной модели	Коэффициент детерминации, R^2	Коэффициент корреляции, R_{xy}
частота колебаний от толщины отложений	полином первой степени	0,939	–0,969
амплитуда колебаний от толщины отложений	полином первой степени	0,869	–0,932
энергия колебаний от толщины отложений	экспоненциальная	0,981	–0,990
длительность колебаний от толщины отложений	полином первой степени	0,958	–0,979

Для определения наиболее значимого параметра проведено исследование с использованием метода главных компонент (PCA). На Рисунке 10 показаны графики счетов и нагрузок. Анализ графиков показал, что главная компонента отвечает за изменение толщины АСПО, а параметр «длительность» (duration) больше всего влияет на модель.

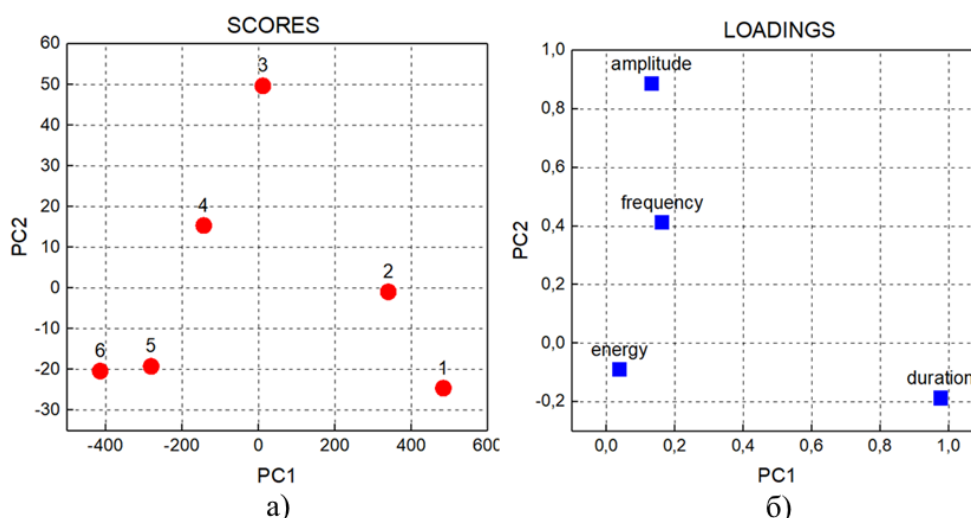


Рисунок 10 – Результаты анализа Методом главных компонент
а - график счетов; б – график нагрузок

Для установления влияния дополнительных факторов проведены дополнительные экспериментальные исследования на трубопроводах одного диаметра, но разной толщины и

трубопроводах одной толщины, но разного диаметра. Результаты измерений подвергнуты двухфакторному дисперсионному анализу. Результаты анализа показаны на Рисунках 11, 12.

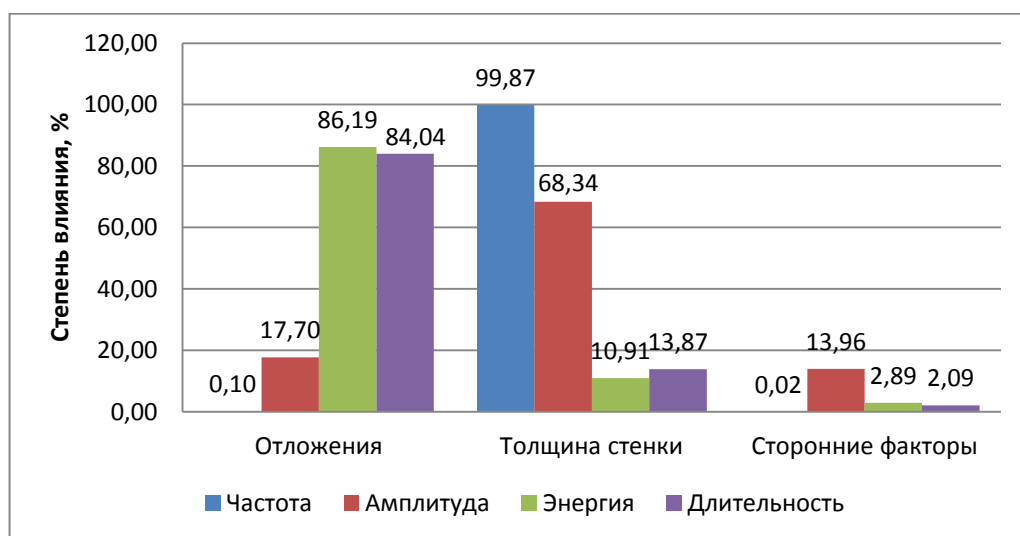


Рисунок 11 – Двухфакторный дисперсионный анализ взаимосвязи параметров колебаний от толщины отложений и толщины стенки трубопровода

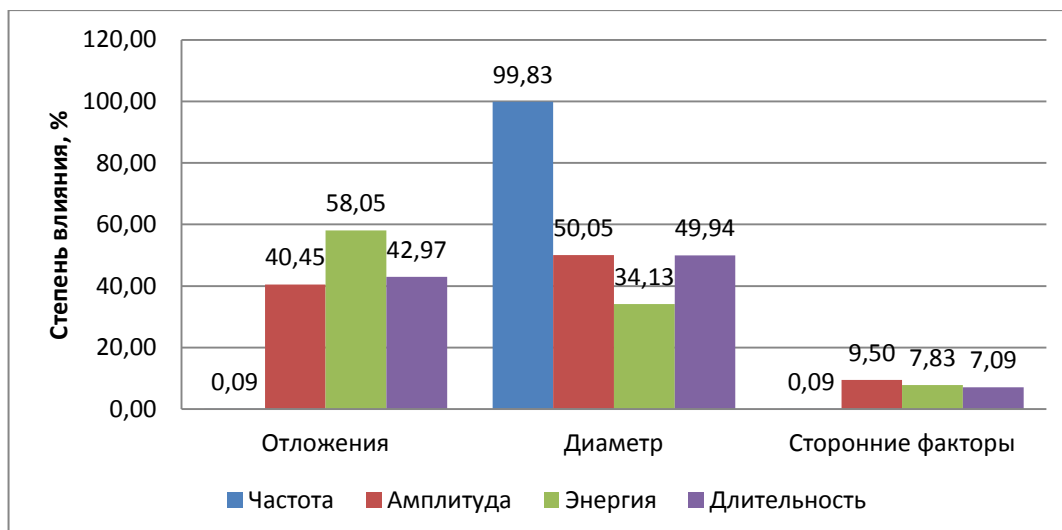


Рисунок 12 – Двухфакторный дисперсионный анализ взаимосвязи параметров колебаний от толщины отложений и диаметра трубопровода

Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования трубопроводов с АСПО определили группу переменных объекта контроля как колебательной системы, которые будучи измеренными при внешнем воздействии, могут характеризовать толщину АСПО. По результатам статистического анализа экспериментальных данных установлено, что в качестве наиболее информативных переменных, по которым целесообразно определять толщину АСПО, выступают энергия и длительность колебаний.

По результатам проведенной работы предложен и обоснован акустический метод измерения толщины АСПО на внутренней стенке трубопроводов, основанный на исследовании зависимости переменных колебаний стенки трубопровода от толщины отложений.

В четвертой главе описываются структурная и функциональная схемы ИИС ОТО, приводится алгоритм калибровки и проведения измерений толщины АСПО. Проведен метрологический анализ системы. Проведено экспериментальное исследование разработанной ИИС ОТО.

Структурная схема показана на Рисунке 13. ИИС ОТО представляет собой многоканальную систему и управляется с автоматизированного рабочего места. Каждый канал состоит из возбуждающего и измерительного трактов.

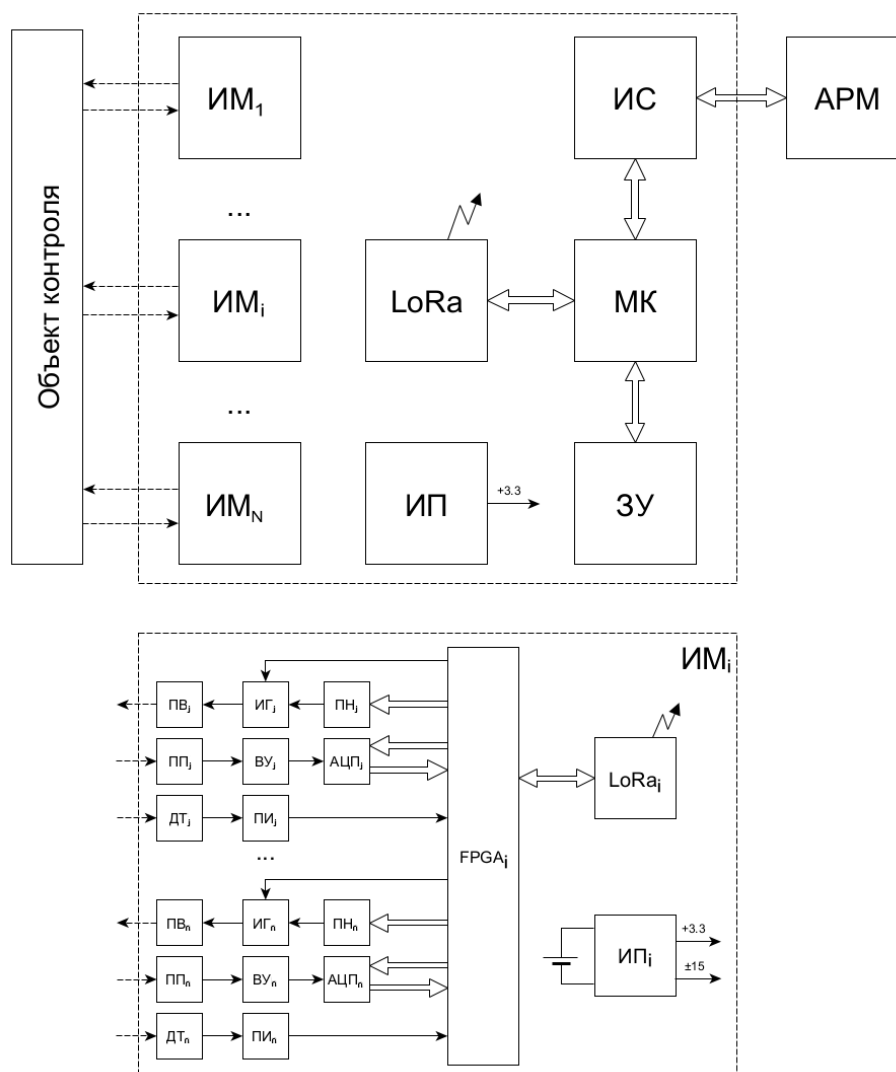


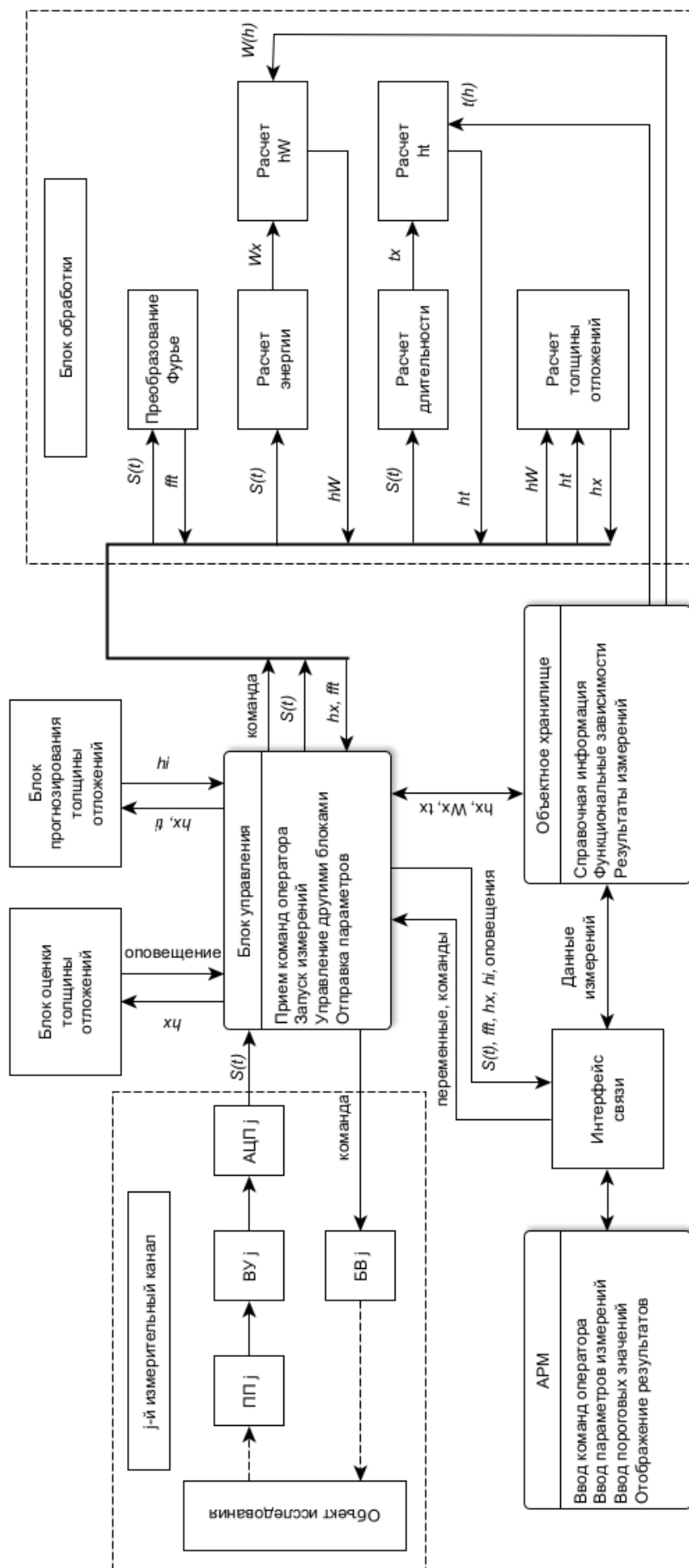
Рисунок 13 – Структурная схема ИИС ОТО

Обозначения: ИМ – измерительный модуль; ПВ – возбудитель колебаний; ИГ – измерительный генератор; ПН – преобразователь напряжения; ПП – первичный преобразователь; ВУ – входной усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ДТ – датчик температуры; ПИ – преобразователь интерфейса; FPGA – программируемая логическая интегральная схема; LoRa – технология беспроводной связи; МК – микроконтроллер; ЗУ – запоминающее устройство; ИП – источник питания; ИС – интерфейс связи; АРМ – автоматизированное рабочее место

Функциональная схема ИИС ОТО показана на Рисунке 14.

Перед проведением измерений проводится калибровка ИИС ОТО на объекте исследования с использованием исследуемых трубопровода и АСПО. Для исключения дестабилизирующего фактора, обусловленного отличающимися физико-химическими характеристикам АСПО, калибровка ИИС ОТО проводится на АСПО, толщина которого подлежит измерению.

Алгоритм калибровки представлен на Рисунках 15, 16. В зависимости от диаметра и толщины трубопровода выбираются амплитуда и период возбуждающих колебаний. Далее проводится измерение на участке трубы без отложений и с отложениями различных толщин. Толщина слоя выбирается исходя из задачи измерения. Для исключения погрешностей проводится серия равнооточных измерений.



Обозначения: $S(t)$ — измерительный сигнал; fft — частотный спектр сигнала; $W(h)$ и $t(h)$ — функциональные зависимости энергии и длительности сигнала от толщины отложений; установленные при калибровке ИИС; W_x и t_x — измеренные значения энергии и длительности сигнала; h_w и h_t — значения толщины АСПО, рассчитанные по функциональным зависимостям; h_x — вычисленная толщина отложений; h_i — прогнозируемая толщина отложений; t_i — время прогноза

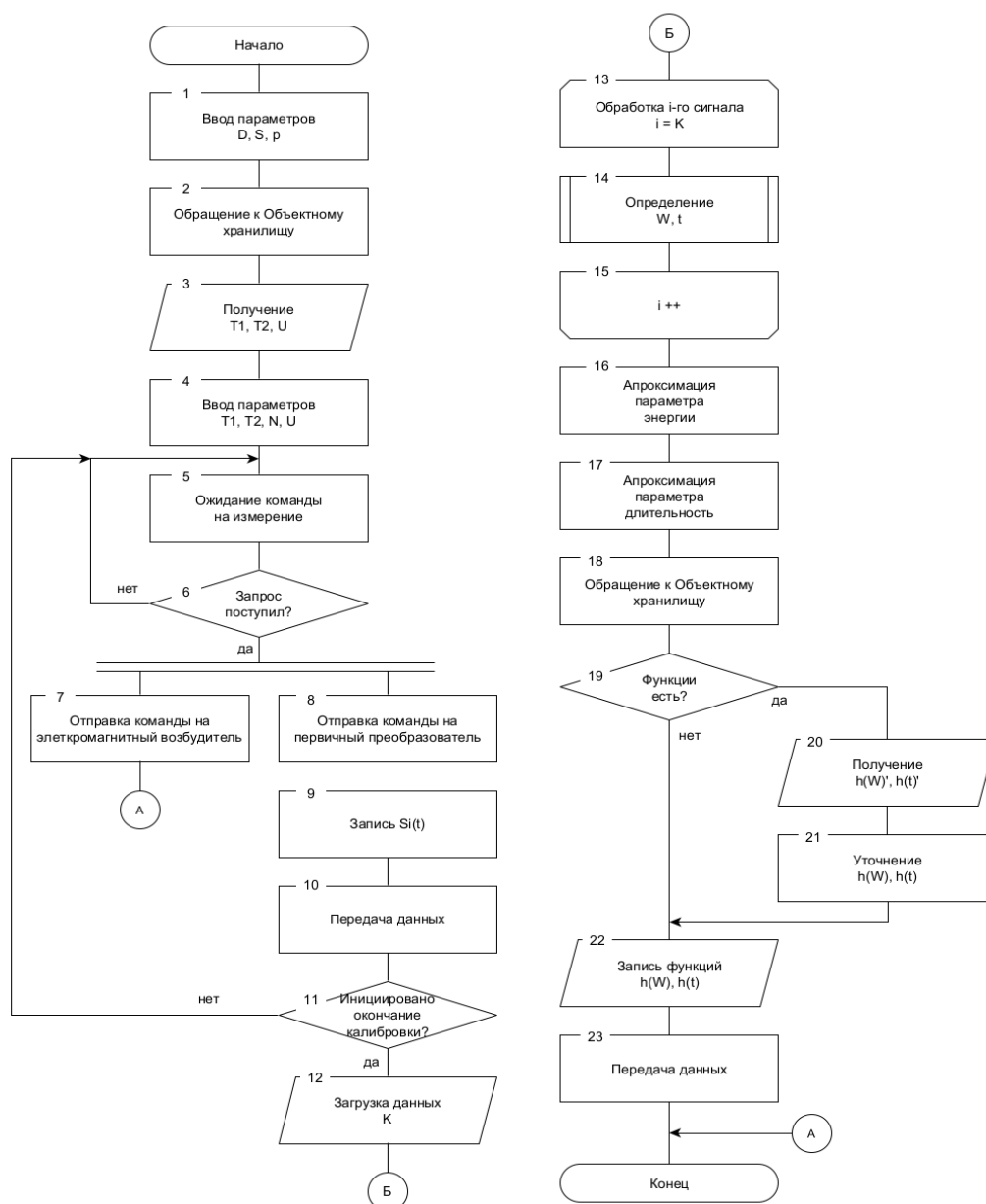


Рисунок 15 – Алгоритм калибровки ИИС ОТО

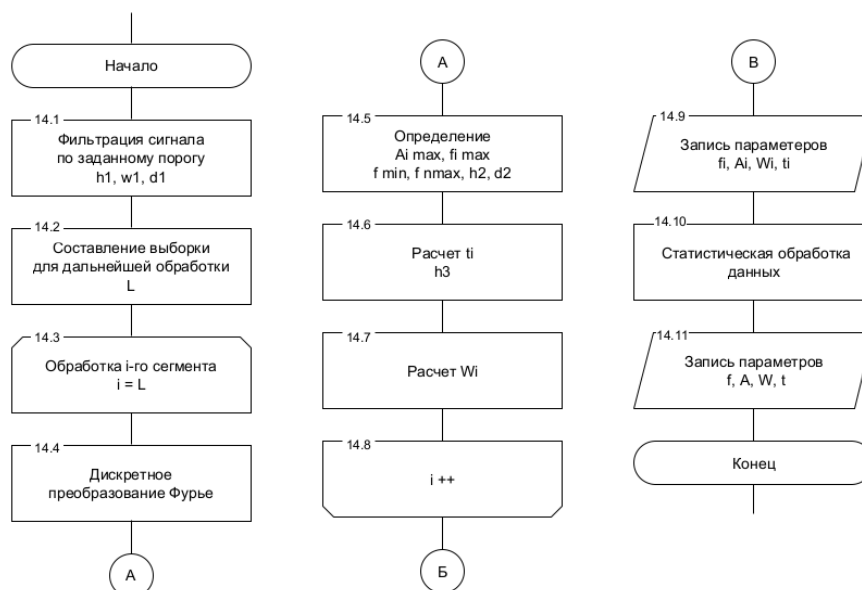


Рисунок 16 – Алгоритм обработки измерительного сигнала

Выбранные параметры измерений и результаты калибровки записываются в Объектное хранилище. Объектное хранилище содержит параметры измерений для отдельных типоразмеров объектов исследования (диаметры, толщины трубопроводов, параметры возбуждающего сигнала), а также построенные функциональные зависимости. Параметры выгружаются перед проведением калибровки и измерений, а также загружаются в Объектное хранилище после проведения калибровки и измерений. По накоплению информации уточняются как сами параметры, так и функциональные зависимости, что приводит к снижению погрешности измерений. Кроме этого накопленная информация позволяет отслеживать динамику образования АСПО во времени.

После калибровки ИИС ОТО устанавливается на объект, на котором проводится постоянное измерение толщины АСПО. Алгоритм проведения измерений показан на Рисунке 17.

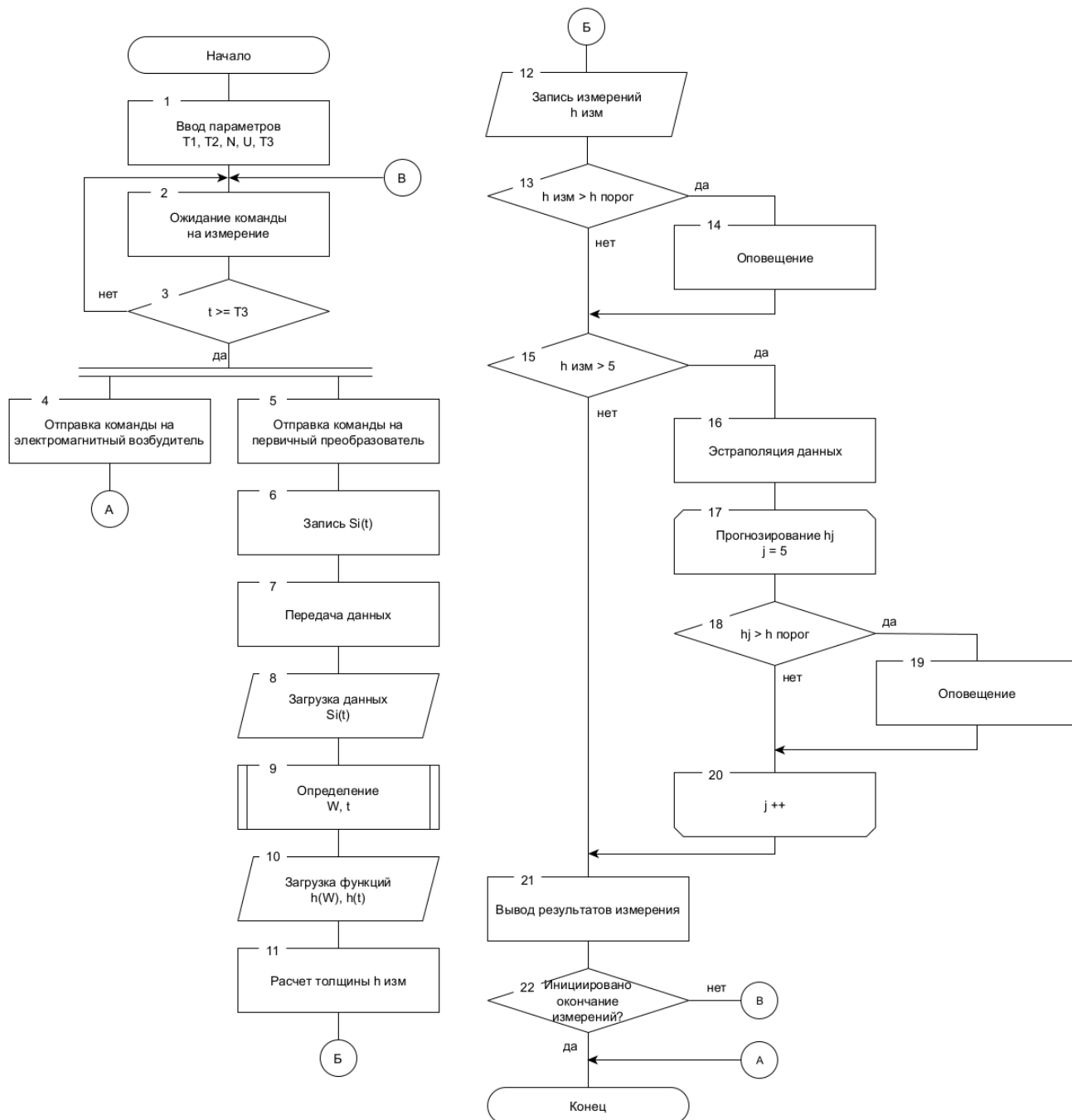


Рисунок 17 – Алгоритм проведения измерений толщины отложений

Преобразователь напряжения повышает напряжение до заданного уровня, после чего через импульсный генератор оно подается с определенным периодом и частотой следования на электромагнитный возбудитель, который возбуждает свободные колебания стенки трубопровода. Колебания снимаются первичным преобразователем, усиливаются и передаются на АЦП. После передачи сигнала на микроконтроллер происходит его обработка и по вычисленным параметрам энергии и длительности сигнала определяется толщина отложений:

$$h_{\text{изм}} = \frac{1}{2}(h_w + h_t), \quad (8)$$

где h_w – измеренное значение толщины АСПО по энергии колебаний; h_t – измеренное значение толщины АСПО по длительности колебаний.

Если толщина отложений превышает установленный порог, происходит оповещение оператора. При наличии 5 и более измерений проводится экстраполяция данных с целью прогнозирования отложений во времени для своевременного планирования очистных мероприятий.

Проведен метрологический анализ измерительного канала ИИС ОТО. Разработана структурная блок-схема измерительного канала (ИК) для расчета инструментальной погрешности (Рисунок 18).

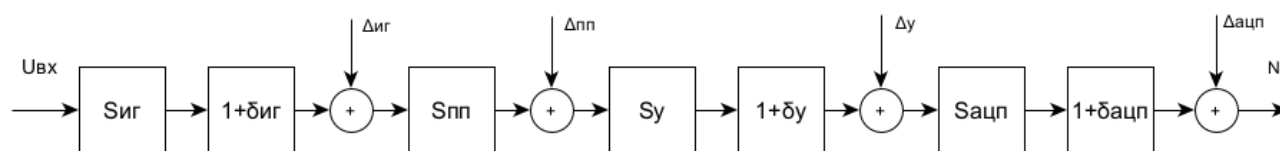


Рисунок 18 – Схема формирования погрешности ИК

Получено значение для относительной погрешности ИК. Погрешность ИК складывается из следующих компонентов:

1) погрешностей генератора: $\delta_{U_{\text{вых}}}$ – погрешность формирования выходного напряжения, $\delta_{\text{ку.иг}}$ – погрешность усиления выходного усилителя, $\Delta_{\text{см.иг}}$ – погрешность смещения выходного усилителя; 2) погрешности нелинейности первичного преобразователя $\Delta_{\text{пп}}$; 3) погрешностей входного усилителя: $\delta_{\text{ку.у}}$ – погрешность усиления входного усилителя, $\Delta_{\text{см.у}}$ – погрешность смещения входного усилителя; 4) погрешностей АЦП: $\delta_{\text{ку.ацп}}$ – погрешность усиления АЦП, $\Delta_{\text{см.ацп}}$ – погрешность смещения АЦП, $\Delta_{\text{кв.ацп}}$ – погрешность квантования АЦП.

Общая погрешность находится по формуле:

$$\sigma[\delta\xi] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2[\delta\xi_i]}, \quad (9)$$

где n – количество компонентов, входящих в ИК; $\sigma[\delta\xi_i]$ – среднее квадратическое отклонение погрешности i -го компонента, %.

Общая инструментальная погрешность ИК составляет 3,75 %.

Выполнен анализ методической погрешности ИИС ОТО. Структурная блок-схема формирования методической погрешности представлена на Рисунке 19.

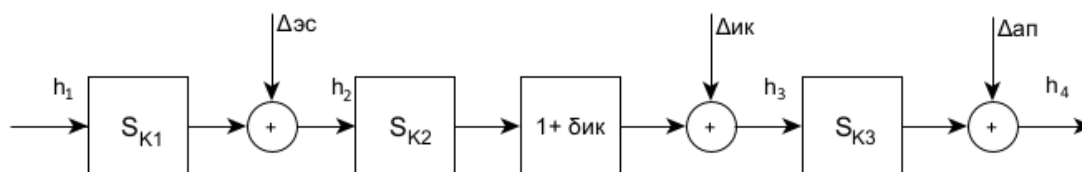


Рисунок 19 – Схема формирования методической погрешности
K1 – эталонный слой отложений, K2 – измерительный канал, K3 – аппроксимация

Основными факторами, влияющими на величину методической погрешности, являются: погрешность определения толщины эталонного слоя отложения $\Delta_{эс}$; погрешности ИК $\delta_{ик}$ и $\Delta_{ик}$; погрешность аппроксимации при установлении функциональных зависимостей $\Delta_{ап}$. Модель формирования методической погрешности:

$$\Delta\theta^M = h\delta_{ик}S_{K1}S_{K2}S_{K3} + \Delta_{эс}S_{K1}S_{K2}S_{K3} + \Delta_{ик}S_{K2}S_{K3} + \Delta_{ап}S_{K3}, \quad (10)$$

где S_{K1}, S_{K2}, S_{K3} – коэффициенты преобразования соответствующего блока.

Погрешность измерения эталонного слоя $\delta_{шц} = 2,5$ %. Погрешность ИК $\delta_{ик} = 3,75$ %. Погрешность аппроксимации вносит наибольший вклад и может достигать по отдельным параметрам 10 %. Изучение погрешности аппроксимации энергии и длительности выявило, что указанные погрешности идут с противоположными знаками относительно друг друга. Поскольку погрешности коррелированы, общая погрешность аппроксимации как сумма по двум параметрам имеет меньшее значение. Таким образом, применяя одновременно несколько параметров, идет снижение погрешности измерения. Так, например, при расчете для трубы 159x8 мм погрешность составила $\delta_{ап} = 3,0$ %, а общая методическая погрешность – $\delta_M = 5,79$ %.

Проведено экспериментальное исследование разработанной ИИС ОТО. Внутри трубопровода 159x8 мм наносился слой отложений различной толщины, и проводилось его измерение с помощью разработанной системы. Результаты исследований представлены в Таблицах 2, 3.

Таблица 2. Результаты измерений с использованием ИИС ОТО

№ экспериментальной серии	Энергия, Дж	Длительность, мс
1	45,91	67,99
2	34,74	50,77
3	17,55	44,34

Таблица 3 – Относительная погрешность определения АСПО с использованием ИИС ОТО

№ экспериментальной серии	Измеренное значение толщины АСПО, мм	Реальное значение толщины АСПО, мм	Относительная погрешность, %
1	5,10	5	2,00
2	7,98	8	-0,25
3	11,04	11	0,36

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Изучены причины образования АСПО и анализ существующих методов и систем измерения толщины отложений на внутренних стенках трубопровода. Сформирован ряд требования к методу измерения толщины отложений.

2. Предложен и обоснован новый акустический метод измерения толщины АСПО на основе исследования зависимости параметров колебаний стенки трубопровода от толщины отложений. Проведено численное моделирование, подтверждающее зависимость акустических параметров колебаний объекта контроля от толщины отложений. Проведены лабораторные исследования и статистическая обработка полученных результатов, доказавшие зависимость параметров колебаний стенки трубопровода (частоты, амплитуды, энергии, длительности) от толщины отложений. На основе статистического анализа определены наиболее значимые параметры – энергия и длительность колебаний. На основе взаимосвязи энергии и длительности колебаний от АСПО разработан акустический метод измерения толщины отложений на внутренней стенке трубопроводов. Получено два патента на изобретение.

3. Разработана ИИС ОТО на основе акустического метода неразрушающего контроля, обеспечивающая контроль параметров толщины отложений в автоматическом режиме, что позволяет сократить затраты на проведение очистительных работ за счет оптимизации интервалов проведения очистных мероприятий. Проведен метрологический анализ ИИС ОТО.

4. Разработаны алгоритмы и методика проведения калибровки и измерений с применением ИИС ОТО. Особенностью методики является калибровка ИИС ОТО непосредственно под среду измерения, что позволяет уменьшить влияние дестабилизирующего фактора от неравномерных физико-химических свойств АСПО, а также проводить прогнозирование отложений АСПО во времени.

5. Разработано программное обеспечение с многоуровневой архитектурой и выделением метрологически значимых и метрологически незначимых частей ПО, что позволило обеспечить надежность выполняемых измерительных операций и достоверность результатов определения толщины АСПО.

6. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СамГТУ, нашли применение при исследовании стенда «Моделирование процесса выпадения асфальтосмолопарафиновых веществ на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб» в ООО «Научно-производственный центр «Самара» г. Самара. Разработанная ИИС ОТО прошла апробацию в АО «Средневолжский научно-исследовательский институт по нефтепереработке» г. Новокуйбышевск. Техничко-экономический расчет показал, что за счет внедрения ИИС ОТО обеспечено снижение погрешности определения толщины АСПО на 7 %. Обеспечено расширение диапазона типоразмеров исследуемых трубопроводов. Использование ИИС ОТО позволит достигнуть снижения затрат на проведение очистных мероприятий на 12 %, за счет оптимизации интервалов проведения очистных мероприятий.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. **Суслов, А.В.** Теоретико-экспериментальное исследование зависимости собственных частот колебаний пластины от толщины отложений / А.В. Суслов, Е.Е. Ярославкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – Т. 29. № 2. – С. 88–99.

2. **Суслов, А.В.** Применение статистических исследований при выявлении зависимости параметров акустических колебаний на участке трубопровода от толщины отложений / А.В. Суслов, Е.Е. Ярославкина // Автоматизация в промышленности. – Москва: ИД «ИнфоАвтоматизация», 2023. – Март 2023. – С. 13-16.

3. **Суслов, А.В.** Исследование влияния температурных напряжений на собственные колебания пластин / А.В. Суслов, Е.Е. Ярославкина // Вестник Самарского университета. Естественнаучная серия. – 2024. – Т 30. № 2. – С. 45–53.

4. **Суслов, А.В.** Акустический метод определения толщины отложений в технологическом оборудовании / А.В. Суслов // Вестник Самарского университета. Естественнаучная серия. – 2025. – Т 31. № 1.

Свидетельства и патенты

5. Патент № 2781414 Российская Федерация, МПК G01B 17/02 (2006.01). Способ определения толщины отложений на внутренней стенке трубопроводов и технологического оборудования : № 2022113711 : заявлено 23.05.2022 : опубликовано 11.10.2022 / **А.В. Суслов**, Е.Е. Ярославкина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СамГТУ. – 7 с.

6. Патент № 2804264 Российская Федерация, МПК G01B 17/02 (2006.01). Способ определения толщины отложений на внутренней стенке трубопроводов и технологического оборудования : № 2023111691 : заявлено 05.05.2023 : опубликовано 26.09.2023 / **А.В. Суслов**, Е.Е. Ярославкина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СамГТУ. – 9 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664569 Российская Федерация. Расчет и прогнозирование толщины отложений в технологическом оборудовании : заявлено 11.09.2024 : опубликовано 10.10.2024 / **А.В. Суслов**, Е.А. Тюрин, А.Ю. Ярославкин; правообладатель ФГБОУ ВО СамГТУ, Бюл. № 10. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

Публикации в других изданиях

8. Ярославкина, Е.Е. Методы определения толщины отложений в нефтепроводах / Е.Е. Ярославкина, **А.В. Суслов** // Информационно-измерительные и управляющие системы: межвуз. сб. научных статей. Под ред. П.К. Ланге. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – №1(18). – С. 210-217.

9. **Суслов, А.В.** Исследование зависимости собственных частот колебаний стенки трубопровода от толщины отложений / А.В. Суслов, Е.Е. Ярославкина // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (12 февраля 2021 года). Редкол.: А.А. Горохов (отв. Ред.). – ЮгоЗап. гос. ун-т., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. – С. 234–238.

10. **Суслов, А.В.** Акустические методы контроля отложения парафина на внутренних стенках трубопроводов / А.В. Суслов, Е.Е. Ярославкина // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022) [Электронный ресурс]: труды Международной научно-технической конференции. Под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. – С. 86–88.

11. **Suslov, A.V.** Acoustic methods for measuring the thickness of deposits on the inner wall of pipelines / A.V. Suslov, E.E. Yaroslavkina // Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering. – Samara, 2023. – V. 21, № 5. – P. 132–144.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 2 от «21» апреля 2025 г.)

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Отпечатано в типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244