

*На правах рукописи*



**ХУСНУТДИНОВА ИЛЬВИНА ГАМИРОВНА**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»  
(нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»).

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Баширов Мусса Гумерович**

Официальные оппоненты: **Пермяков Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» / кафедра «Техносферная безопасность», профессор

**Загидулин Тимур Ринатович**  
кандидат технических наук  
ООО «Научно-технический центр «Спектр» /  
технический директор

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «14» июня 2019 года в 12.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.289.05 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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Абуталипова Елена Мидхатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Отказы технологических трубопроводов на нефтегазовых объектах приводят зачастую к их разгерметизации, которая, в свою очередь, может осложняться взрывами и пожарами, а также образованием смесей, оказывающих токсическое воздействие на людей и окружающую среду. Согласно существующим федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности неотъемлемой частью ее обеспечения является оценка технического состояния таких опасных производственных объектов как технологические трубопроводы, включающая определение ресурса их безопасной эксплуатации.

Известно, что более 30 % всех аварий на предприятиях по переработке и хранению углеводородного сырья приходится на технологические трубопроводы. Это свидетельствует, в том числе, о недостаточной эффективности применяемых при проведении экспертизы безопасности данных объектов методов оценки и прогнозирования их остаточного ресурса.

Применяемые в настоящее время методы оценки технического состояния технологических трубопроводов, основанные на идентификации параметров уже развившихся дефектов (трещины, поры, раковины, различные коррозионные поражения металла и др.), непригодны при наличии дефектов на ранних стадиях их развития, когда в структуре металла начинают происходить процессы деградации, также способные стать причиной внезапного разрушения трубопровода.

В последние годы уделяется значительное внимание разработке и применению неразрушающих методов оценки технического состояния изделий, основанных на электромагнитно-акустическом (ЭМА) эффекте, которые позволяют генерировать в объекте контроля акустические волны и считывать информацию о его техническом состоянии. При этом используются лишь некоторые параметры акустических волн, например приращение времени их распространения, значения амплитуды и фазы, отношение времени распространения поперечных и продольных волн. Информативный потенциал ЭМА эффекта реализуется отнюдь не в полной мере. Кроме того, ЭМА эффект применяют в основном в толщинометрии и при выявлении дефектов типа несплошностей.

Следует отметить, что для интегральной оценки технического состояния объектов, характеризующихся комплексом параметров, начинают находить применение

математические модели их динамики на основе передаточной функции. Так, передаточная функция, полученная посредством применения вихретокового метода неразрушающего контроля, успешно использована Э.М. Башировой для определения предельного состояния металла нефтегазового оборудования.

В связи с изложенным, представляется перспективным проведение исследований, направленных на совместное применение ЭМА эффекта и математических моделей динамики напряженно-деформированного состояния металла технологических трубопроводов, что позволило бы существенно повысить безопасность данных объектов на основе более достоверной и точной экспертизы их технического состояния и остаточного ресурса работы.

### **Степень разработанности выбранной темы**

К моменту начала работы над диссертацией в российских и зарубежных периодических изданиях и монографиях присутствовало значительное количество публикаций, посвященных оценке технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации оборудования на основе анализа изменения механических и физических свойств металла под воздействием рабочих нагрузок, а также внешних и внутренних сред. В частности, показано изменение акустических свойств металлов в процессе накопления повреждений их структуры. Изучению деградации структуры металлов с использованием ЭМА эффекта посвящены лишь фрагментарные исследования. Установлено, что параметры ЭМА сигнала весьма чувствительны к эволюции механических, электрических, магнитных и акустических характеристик металлов. Публикации, затрагивающие применение передаточной функции, которую получают с использованием ЭМА эффекта, с целью оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов, в периодических изданиях и монографиях отсутствовали.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема работы и содержание исследований соответствуют **пункту 13** области исследований, определяемой паспортом специальности 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)»: **п. 13** «Разработка методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации технических устройств сложных технических систем опасных производственных объектов».

### **Цель работы**

Повышение безопасности технологических трубопроводов нефтегазовых объектов посредством совместного применения электромагнитно-акустического эффек-

та и метода динамической идентификации напряженно-деформированного состояния металла.

В диссертации решались следующие **задачи**:

1 Анализ состояния проблемы обеспечения безопасной эксплуатации технологических трубопроводов с позиций совместного применения физических методов диагностики и математических методов теории автоматизации.

2 Научное обоснование применимости ЭМА эффекта для достоверной диагностики деградации структуры металла технологических трубопроводов в ходе эксплуатации и передаточной функции как инструмента прогнозирования их остаточного ресурса в данных условиях.

3 Экспериментальные исследования закономерностей изменения структурно-чувствительных параметров ЭМА эффекта в условиях, имитирующих особенности эксплуатации технологических трубопроводов. Поиск и научное обоснование интегрального параметра, позволяющего проводить достоверную и высокоточную количественную оценку технического состояния данных объектов.

4 Разработка методических основ и соответствующего программно-аппаратного комплекса для проведения оперативного контроля и оценки остаточного ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов с использованием ЭМА эффекта.

### **Научная новизна**

Впервые предложено и научно обосновано совместное применение электромагнитно-акустического эффекта и математической модели динамики напряженно-деформированного состояния технологических трубопроводов в виде передаточной функции для повышения достоверности и точности оценки их остаточного ресурса с учетом деградации структуры металла в процессе эксплуатации.

В качестве критерия количественной оценки уровня безопасности технологических трубопроводов предложен интегральный параметр безопасности, вычисляемый с учетом значений всех параметров передаточной функции. При этом установлено снижение интегрального параметра безопасности, изменяющегося от 1 до 0, по мере достижения металлом предельного состояния, что соответствует физическому смыслу данного параметра и доказывает правомерность его использования в качестве предлагаемого критерия.

## **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в создании и научном обосновании нового метода оценки технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе совместного использования электромагнитно-акустического эффекта и математической модели динамики напряженно-деформированного состояния металла в виде передаточной функции.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1 Разработаны устройство и программное обеспечение для оперативного контроля технического состояния и остаточного ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов (патент РФ на полезную модель № 169803, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617490).

2 Подготовлена методика оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов на основе совместного использования электромагнитно-акустического эффекта и динамической идентификации степени поврежденности металла, которая принята к применению в ООО «Антикорсервис» для дополнительно контроля состояния металла трубопроводов, а также в ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория» при проведении работ по совершенствованию существующих методик оценки безопасности нефтегазового оборудования.

3 Основные результаты исследований применяются в учебном процессе филиала УГНТУ в г. Салавате при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Безопасность профессиональной деятельности», «Диагностика технического состояния и оценка ресурса оборудования» в рамках подготовки студентов по специальности 21.05.06 – «Нефтегазовая техника и технологии»; «Диагностика технического состояния и оценка ресурса оборудования» в рамках подготовки бакалавров по направлению 18.03.02 – «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

## **Методология и методы исследований**

Методология исследований заключалась в установлении параметров передаточной функции методом идентификации по временной характеристике сигнала отклика ЭМА эффекта, анализе закономерностей изменения этих параметров, вызываемого эволюцией электрических, магнитных и акустических свойств трубных сталей в условиях, которые имитируют особенности эксплуатации технологических трубопро-

водов, сопоставлении калибровки ЭМА устройства с результатами параллельной калибровки тензометрического измерителя деформаций, сравнительном анализе значений потенциального пожарного риска, получаемых с помощью ультразвукового контроля контактным пьезопреобразователем и с применением предлагаемого метода.

Исследования в условиях, имитирующих особенности эксплуатации технологических трубопроводов, проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 25.502-79. Калибровку ЭМА устройства с программным обеспечением осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 55047-2012. Потенциальный пожарный риск рассчитывали в программе «PromRisk – расчет риска на производственных объектах» (лицензия Hardware ID: 23B88-07AE6-C729C-A18F3) в соответствии с утвержденной методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Трехмерное моделирование проявления ЭМА эффекта проводили методом конечных элементов и на основе полученной модели оптимизировали параметры протекающего процесса.

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

1 Разработанный метод оценки технического состояния и остаточного ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе совместного использования ЭМА эффекта и математической модели динамики напряженно-деформированного состояния металла в виде передаточной функции.

2 Научное обоснование возможности использования предложенного интегрального параметра безопасности, вычисляемого с учетом значений всех параметров передаточной функции, в качестве критерия количественной оценки уровня безопасности технологических трубопроводов.

3 Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения интегрального параметра безопасности в условиях, имитирующих особенности эксплуатации технологических трубопроводов.

4 Принцип работы программно-аппаратного комплекса, созданного на базе подготовленной методики оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов на основе совместного использования электромагнитно-акустического эффекта и динамической идентификации степени поврежденности металла.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения широко апробированных, а также оригинальных методов и методик экспериментальных ис-

следований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждались на Междунар. молодежной науч. конф. РНК СИГРЭ (Казань, 2014; 2015); Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения» (Казань, 2012–2015); Всерос. Стартап-туре 2015 (Уфа, 2015); молодежном форуме ПФО «iВолга-2015» (Самарская область, 2015); Междунар. науч.-практ. конф. «Федоровские чтения» (Москва, 2014; 2016); Междунар. науч.-методич. конф. «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля» (Салават, 2014–2018); Междунар. науч.-техн. конф. «Наука. Технология. Производство» (Салават, 2014–2017); Междунар. науч.-практ. конф. «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (Белгород, 2014); Междунар. науч.-техн. конф. «Экология и ресурсосбережение в нефтехимии и нефтепереработке» (Салават, 2017); Межрегиональной науч. конф. «XI ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых» (Вологда, 2017).

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 35 печатных работ, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 статья – в базе данных научного цитирования Scopus. Получены патент на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 29 таблиц, состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников из 179 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит аналитический обзор состояния проблемы обеспечения безопасности технологических трубопроводов нефтегазовой отрасли.

Оценке технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации оборудования на основе анализа изменения механических и физических свойств металла посвящены работы Э.С. Горкунова, А.А. Абакумова, К.М. Гумерова, Н.А. Махутова, И.Р. Кузеева, Д.Е. Бугая, Р.В. Загидуллина, Г.Х. Самигуллина, З.Х. Павловой, М.Г. Баширова и др.

В работах Р.В. Агинея, А.С. Кузьбожева, Ю.А. Теплинского, В.Ф. Мужичко, Б.Е. Попова, Г.Я. Безлюдько исследованы возможности магнитных методов по раннему обнаружению структурных изменений и прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации оборудования. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металла обсуждается в работах А.А. Дубова, В.Г. Кулеева, Р.Г. Вильданова, Р.В. Загидуллина, Т.Р. Загидуллина.

В работах А.К. Гурвича, Л.Б. Зуева, К.Л. Комарова, Ю.А. Чиркова, Е.А. Наумкина, А.В. Прохорова и др. приведены результаты исследований изменения акустических свойств металлов в процессе накопления повреждений под действием различных эксплуатационных факторов.

Исследования ЭМА эффекта и возможности его практического применения проводили Ю.М. Шкарлет, Ю.И. Сазонов, С.Н. Шубаев, А.В. Харитонов, С.Ю. Гуревич, Н.П. Алёшин и др. Выявлению деградации структуры металла на ранней стадии и тензометрии с использованием ЭМА эффекта посвящены работы Н.А. Щипакова, В.В. Муравьева, О.В. Муравьева, Е.Н. Балобанова, В.А. Стрижака, А.В. Платунова, А.Н. Смирнова и др. Электромагнитно-акустические методы контроля рассматриваются в работах таких зарубежных исследователей, как E.R. Dobbs (Великобритания), K. Kavashima, H. Ogi, M. Hirao (все – Япония), G. Alers (США), Y.D. Huang (Китай).

Применение передаточной функции в качестве интегральной оценки технического состояния объектов в задачах промышленной безопасности встречается в работах Н.П. Абовского, Э.М. Башировой, А.Т. Шарипкуловой. В частности, ГОСТ 32019-2012 рекомендуется использование передаточных функций элементов зданий и сооружений для оценки их напряженно-деформированного состояния.

На основании статистических данных за период 2013–2017 гг. проведен анализ причин и последствий отказов технологических трубопроводов в нефтегазовой отрасли. Анализ показал, что при проведении экспертизы промышленной безопас-

ности не учитывалось старение металла трубопроводов, расчет остаточного ресурса проводился по утонению стенки труб при исходных механических свойствах металла без учета его фактического напряженно-деформированного состояния. Поэтому для повышения безопасности технологических трубопроводов необходимо привлечение методов оценки их ресурса, учитывающих фактическое напряженно-деформированное состояние металла и особенности деградации его структуры.

Согласно ГОСТ 32569-2013 и РТМ 38.001-94, необходимость оценки напряженно-деформированного состояния металла регламентируется уже на стадии проектирования трубопроводов. В настоящее время эта задача решается расчетным путем, однако реальное напряженно-деформированное состояние металла трубопровода не всегда соответствует результатам теоретических расчетов и существенно изменяется в процессе его монтажа и эксплуатации. Ввод в действие ГОСТ Р 52330-2005, ГОСТ Р 53006-2008 и ГОСТ Р 55047-2012 делает актуальной задачу инструментального определения фактического напряженно-деформированного состояния металла технологических трубопроводов.

По нашему мнению, совместное применение ЭМА эффекта и передаточной функции в качестве инструмента прогнозирования остаточного ресурса позволяет существенно повысить достоверность и точность экспертизы технического состояния и остаточного ресурса технологических трубопроводов.

Во **второй главе** рассмотрены основы теории ЭМА эффекта, примеры его использования для оценки технического состояния оборудования различных отраслей промышленности, а также информативные параметры ЭМА сигнала. На базе этих параметров предложен интегральный параметр для оценки технического состояния технологических трубопроводов.

В результате совместного воздействия на объект контроля постоянного и переменного магнитных полей возникает ЭМА эффект, который проявляется в магнитном, магнитострикционном и электродинамическом взаимодействии электромагнитного поля с объектом контроля. В последнем бесконтактно генерируются акустические волны, которые отражаются от противоположной поверхности объекта и возбуждают в измерительной обмотке сигнал отклика, несущий информацию об объекте контроля в виде изменения частотных и временных параметров. При этом в случае металлических объектов параметры ЭМА сигнала являются структурночувствительными, так

как четко реагируют на эволюцию их структуры и напряженно-деформированного состояния. В настоящее время информативный потенциал ЭМА эффекта ограничивается параметрами акустической волны и реализуется не в полной мере.

С нашей точки зрения, в качестве интегрального параметра, характеризующего совокупность механических, акустических, магнитных и электрических свойств металла, можно использовать передаточную функцию объекта контроля. Она является математической моделью динамики изменения указанных свойств объекта и представляет собой отношение приращений сигнала отклика объекта и сигнала внешнего воздействия, записанное в операторной форме при нулевых начальных условиях. Следует отметить, что правомерность такого подхода косвенно подтверждается применением передаточной функции в механике для автоматического управления напряженно-деформированным состоянием сложных металлических конструкций и определения предельного состояния металла оборудования.

Изменения структуры металла, зарождение и развитие повреждений отражаются на значениях параметров передаточной функции – коэффициентах полиномов числителя и знаменателя и, соответственно, на значениях корней полиномов. Поэтому анализ параметров передаточной функции позволяет идентифицировать эти изменения.

В общем виде передаточная функция любой системы в операторной форме может быть записана как

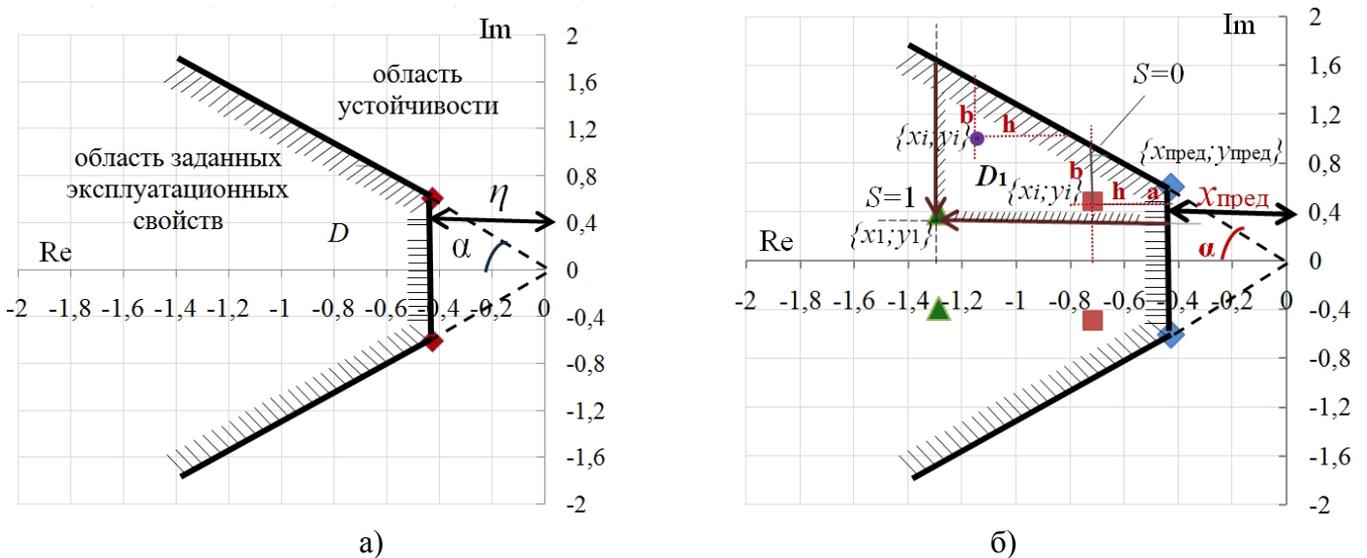
$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = K \frac{b_0 + b_1 \cdot p + \dots + b_m \cdot p^m}{a_0 + a_1 \cdot p + \dots + a_n \cdot p^n} = K \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (1)$$

где  $Y(p)$  и  $X(p)$  – приращения сигналов отклика и внешнего воздействия;  $B(p)$  и  $A(p)$  – полиномы числителя и знаменателя;  $K$  – коэффициент усиления;  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты полиномов.

В качестве математической модели локальной зоны контроля участка трубопровода использовали передаточную функцию второго порядка без запаздывания.

В отличие от классического понимания передаточной функции объекта как математической модели с постоянными параметрами нами передаточная функция рассматривалась как описанная выше интегральная характеристика.

Отслеживая миграцию координат значений корней характеристического полинома на комплексной плоскости, можно контролировать изменение свойств объекта контроля, на основании чего определять предельное состояние металла и оценивать остаточный ресурс трубопровода. Для интегральной количественной оценки состояния объекта контроля использовали площадь области комплексной плоскости, за пределы которой не должны выходить значения корней характеристического полинома при заданных эксплуатационных свойствах объекта. Координаты корней, наиболее близкого к оси мнимых значений  $x_{\text{пред}}$  и наиболее отдаленного от оси вещественных значений  $y_{\text{пред}}$ , определенных при достижении объектом предельного состояния, очерчивают границы области заданных эксплуатационных свойств объекта  $D$  (рисунок 1).



а) область заданных эксплуатационных свойств трубопровода  $D$ ;

б) область работоспособного состояния трубопровода  $D_1$

Рисунок 1 – Оценка текущего технического состояния и ресурса трубопровода по координатам корней характеристического полинома

Координаты корней при исходном (исправном) состоянии объекта  $\{x_1, y_1\}$  совместно с границами области заданных эксплуатационных свойств  $D$  определяют границы области работоспособного состояния объекта  $D_1$ , которая характеризует удаленность исходного состояния объекта от его предельного состояния.

Количественно  $D_1$  можно выразить формулой

$$D_1 = \int_{x_{\text{пред}}}^{x_1} (\operatorname{tg} \alpha \cdot x - y_1) dx, \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = y_{\text{пред}}/x_{\text{пред}}$ .

В процессе эксплуатации объекта или при его испытаниях координаты корней характеристического полинома  $\{x_i, y_i\}$  мигрируют к границам области заданных эксплуатационных свойств  $D$ , и область работоспособного состояния объекта уменьшается от первоначального значения  $D_1$  до нуля при достижении предельного состояния. Эту текущую область работоспособного состояния обозначили  $D_i$ :

$$D_i = \int_{x_{\text{пред}}}^{x_i} (\operatorname{tg} \alpha \cdot x - y_i) dx. \quad (3)$$

Отношение  $S = D_i/D_1$ , характеризующее техническое состояние и остаточный ресурс объекта, было названо интегральным параметром безопасности. По мере исчерпания ресурса объекта его значение уменьшается от 1 до 0. Для систем автоматического управления расстояние от мнимой оси до действительной части ближайшего к ней корня называется степенью устойчивости  $\eta$ . Вследствие симметрии области заданных эксплуатационных свойств объекта относительно оси абсцисс использовали только корни характеристического полинома с положительной мнимой частью.

**Третья глава** посвящена исследованию взаимосвязи информативных параметров ЭМА сигнала и свойств металла технологических трубопроводов при статических и циклических нагрузках.

В качестве объекта исследований использовали стали марок СтЗсп, сталь 10, 09Г2С, широко применяемые для изготовления трубопроводов. Испытания проводили согласно ГОСТ 25.502-79 и ГОСТ 1497-84 на плоских образцах.

Для установления необходимых характеристик электромагнитных и акустических волн, а также информативных параметров ЭМА сигнала осуществили 3D моделирование ЭМА эффекта методом конечных элементов в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS (рисунок 2).

Результаты 3D моделирования послужили основанием для выбора сдвиговых волн с радиальной поляризацией и оптимальных параметров зондирующего акустического импульса – длительность 2 мкс, частота следования 5,1 МГц.

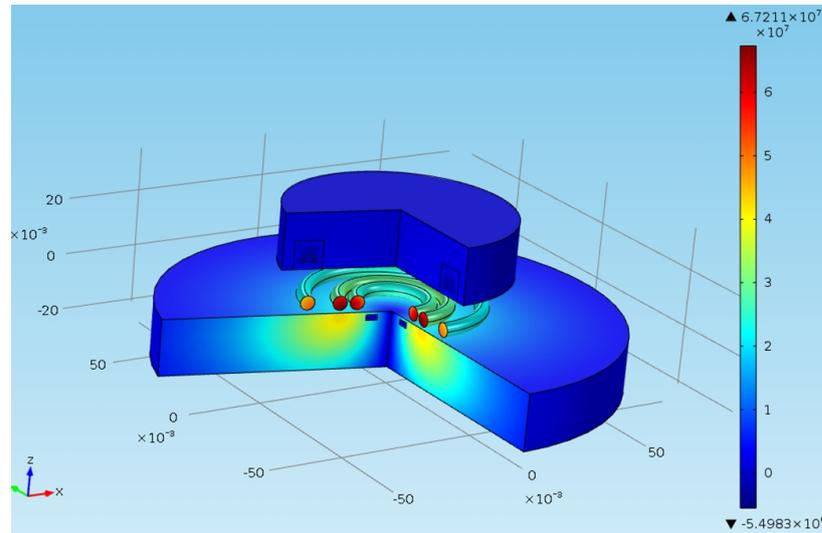


Рисунок 2 – Трехмерное моделирование ЭМА эффекта

Далее разработали и изготовили методом 3D печати ЭМА преобразователь (ЭМАП), обеспечивающий генерирование в металле и прием акустических волн с указанными параметрами. Регистрацию сигнала ЭМАП производили через 250 кгс при статическом нагружении и через 200 циклов при циклическом нагружении с частотой 25 циклов в минуту и симметричной деформацией 0,34 мм. Измерения с помощью ЭМАП производили в заранее отмеченных точках на поверхности образцов с использованием осциллографа АСК-2108 и ЭМА толщиномера EM2210 (разработчик ООО НПО «Октанта») с программным обеспечением ScanView.

Для экспериментальных исследований изменения информативных параметров ЭМА сигнала в условиях, имитирующих особенности эксплуатации технологических трубопроводов, была создана специальная установка (рисунок 3).

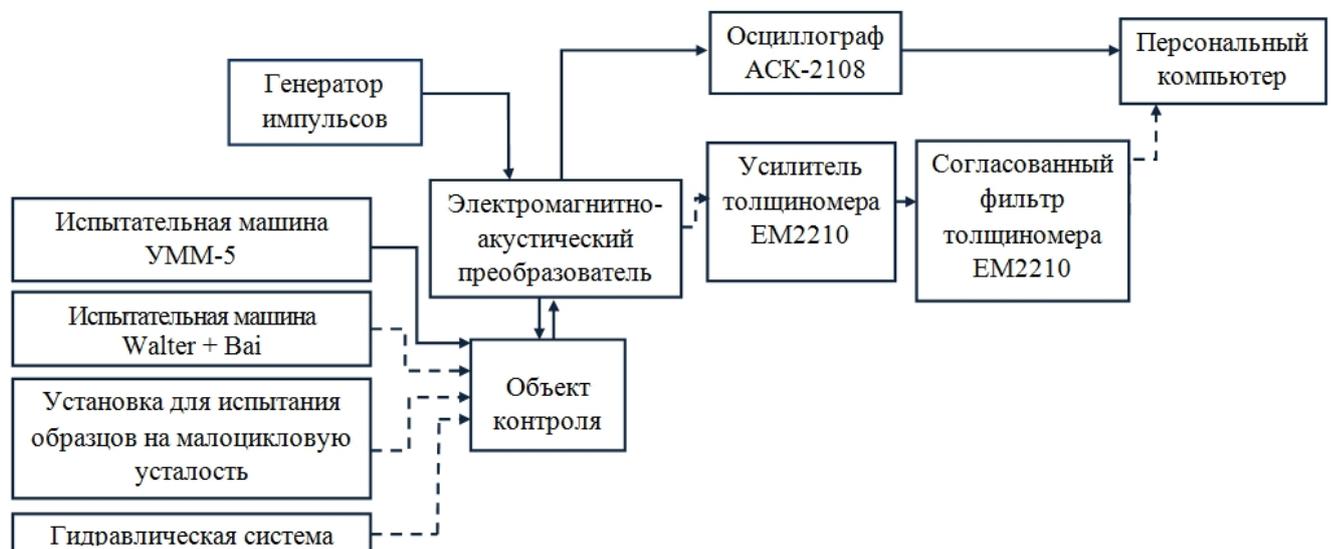


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки

Испытания образцов в условиях квазистатического нагружения проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84 на испытательных машинах УММ-5 и Walter + Bai (ФРГ). Для испытаний плоских образцов на малоцикловую усталость (ГОСТ 25.502-79) использовали установку, описанную в патенте № 2262682 РФ.

На рисунке 4 представлено изменение ЭМА сигнала при растяжении образцов из стали марок СтЗсп и 09Г2С. Идентификацию передаточной функции осуществляли по импульсной временной характеристике ЭМАП сигнала методом динамической идентификации с использованием компьютерной программы, позволяющей при произвольном виде входного сигнала и отклика получать параметры передаточной функции.

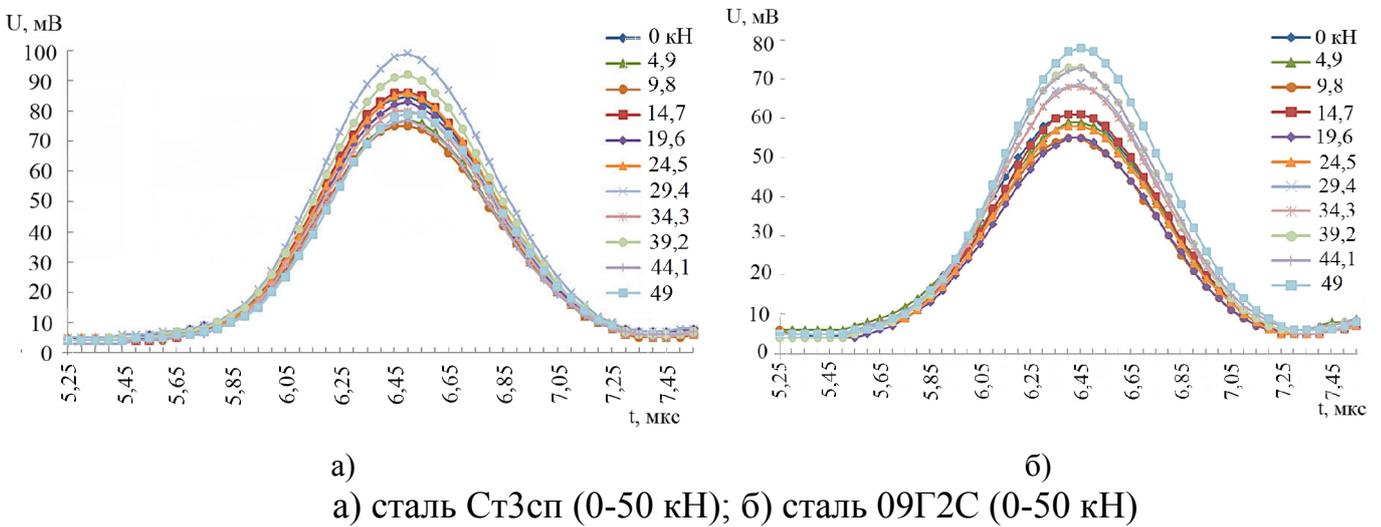
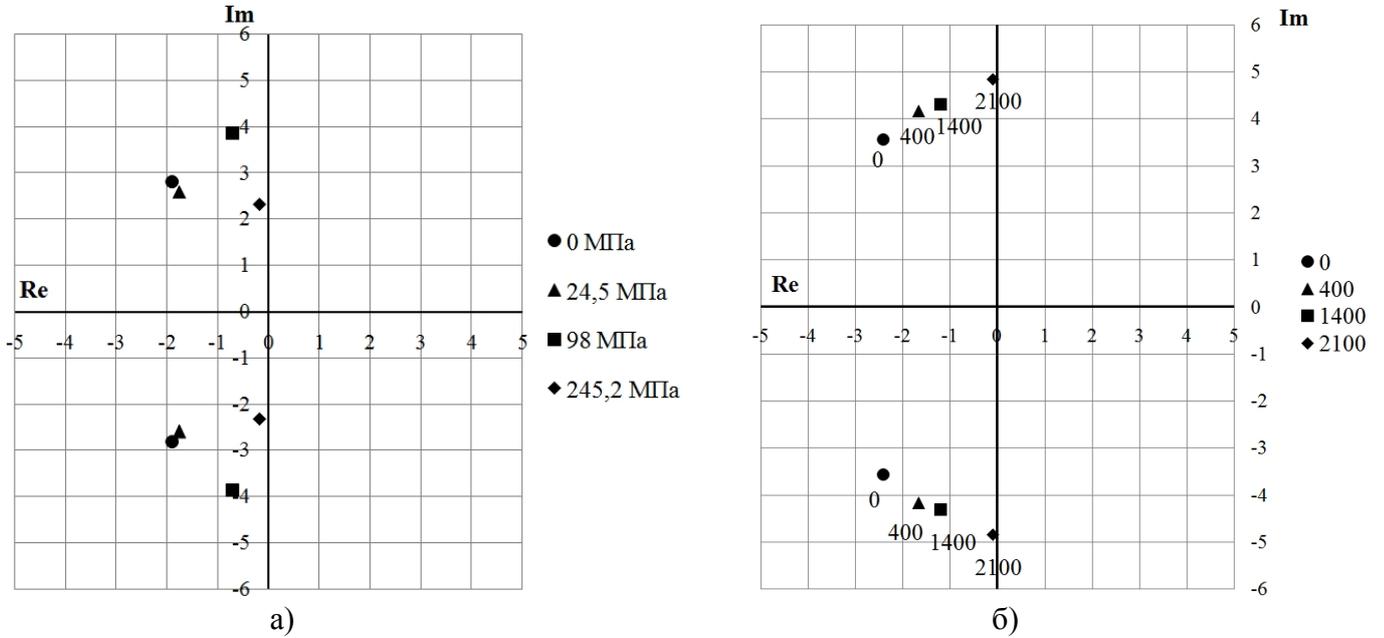


Рисунок 4 – Изменение донного (отраженного) ЭМА сигнала при растяжении

На рисунке 5 изображена миграция координат корней характеристического полинома передаточной функции на комплексной плоскости при растяжении и циклическом нагружении образцов из стали СтЗсп.

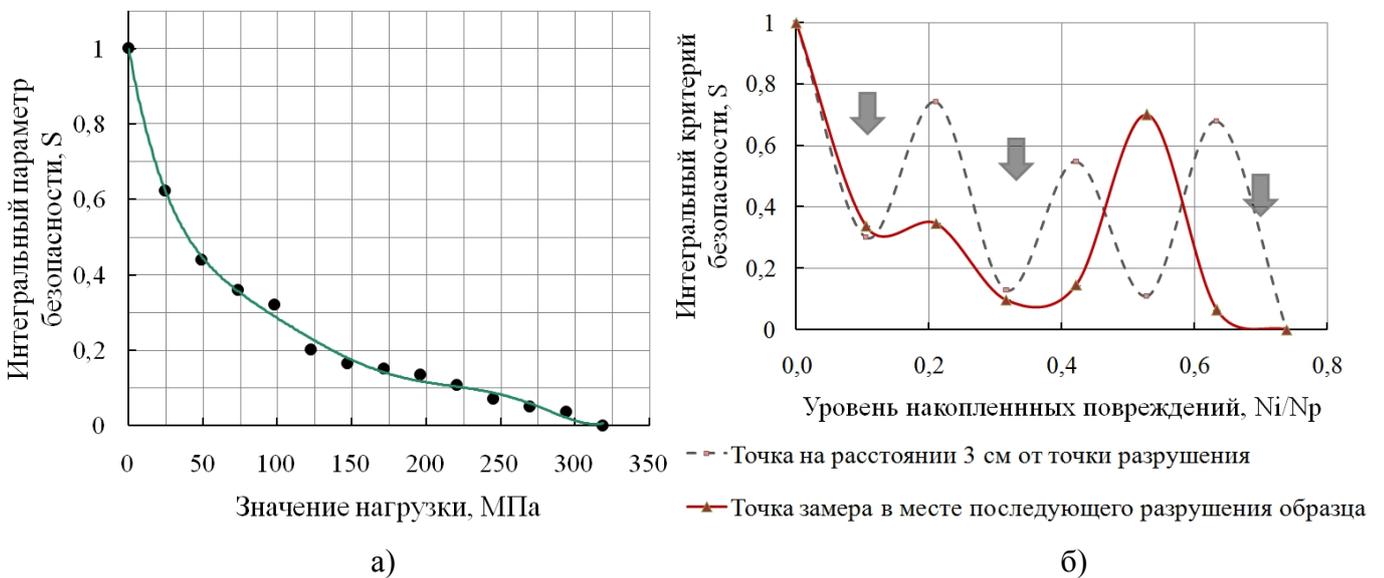
На рисунке 6 представлено изменение интегрального параметра безопасности  $S$  для стали 09Г2С при действии статической и циклической нагрузок. При оценке состояния металла оборудования в ходе циклического нагружения уровень накопленных повреждений оценивали с помощью условного параметра – отношения фактического числа циклов нагружения к числу циклов, при котором происходит разрушение материала ( $N_i / N_R$ ).



а) статическая нагрузка, ГОСТ 1497-84, тип образца № 1;

б) циклическая нагрузка, 0–2300 циклов, ГОСТ 25.502-79, тип образца № 2

Рисунок 5 – Миграция координат корней характеристического полинома при действии статической и циклической нагрузок (СтЗсп)



а) статическая нагрузка, ГОСТ 1497-84, тип образца № 1;

б) циклическая нагрузка, ГОСТ 25.502-79, тип образца № 2

Рисунок 6 – Изменение интегрального параметра безопасности  $S$  (09Г2С)

При циклическом нагружении наблюдается стадийный характер зависимости параметра  $S$  от  $N_i / N_R$ . По нашему мнению, это объясняется интенсивной эволюцией

тонкой структуры, связанной с адаптацией металла к внешнему воздействию: происходит смена механизмов адаптации, что и выражается в стадийности изменения параметра  $S$ . Полученные результаты коррелируют с данными исследований других авторов, использовавших иные параметры для оценки поврежденности структуры конструкционных сталей. В частности, в работах И.Г. Абдуллина и Д.Е. Бугая показано, что стадийность изменения уровня микродеформаций кристаллической решетки сталей с различными типами сингоний при малоциклового усталости связана с чередованием процессов упрочнения и разупрочнения металла в ходе эволюции дислокационных скоплений.

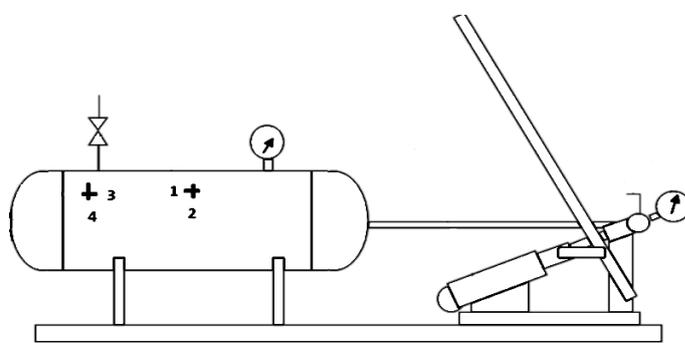
Одинаковые значения  $S$  получаются при равных величинах вещественной части комплексных корней характеристического полинома, но эти корни отличаются аргументами, то есть значениями мнимых частей. Дополнение значения интегрального параметра безопасности  $S$  аргументом соответствующего комплексного корня позволяет устранять влияние неоднозначности зависимости  $S$  от  $(N_i / N_R)$  на оценку уровня накопленных повреждений.

В соответствии с ГОСТ Р 55047-2012, произвели калибровку ЭМА устройства на участке упругих деформаций диаграммы растяжения стали СтЗсп при гидравлическом испытании модели участка технологического трубопровода. Результаты калибровки сопоставляли с результатами параллельной калибровки тензометра ИТЦ-03-32 с проволочными тензодатчиками.

На рисунке 7 представлена установка для безэталонной калибровки ЭМА устройства с программным обеспечением. Модель трубопровода представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 209 мм и толщиной стенки 10 мм.



а)



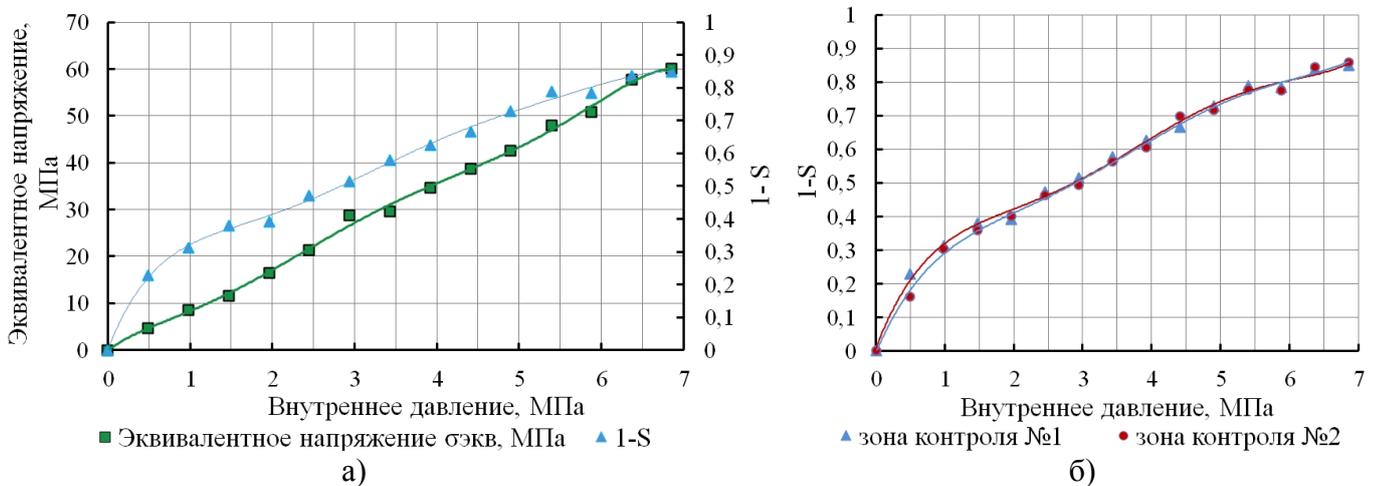
б)

а) модель трубопровода; б) схема установки

Рисунок 7 – Установка для безэталонной калибровки ЭМА устройства

По результатам калибровки построены тарировочные кривые (рисунок 8). Для удобства сопоставления с результатами калибровки тензометра тарировочная кривая для ЭМА устройства построена в виде зависимости  $(1 - S)$ .

Для проверки результатов калибровки проводили измерение напряжений в зоне 2, отстоящей на 500 мм по образующей от зоны 1, при тех же значениях давления, что и в процессе тарировки. Максимальная погрешность определения предельного состояния металла трубопровода по значению параметра безопасности  $S$ , соответствующему пределу текучести, в сопоставлении с показаниями проволочного тензометра составила 5,4 %.



а) ЭМА устройство и тензометр ИТЦ-03-32; б) сопоставление тарировочной кривой в зоне 1 с результатами измерения напряжения в зоне 2

Рисунок 8 – Тарировочные кривые

Согласно ГОСТ Р 55047-2012, максимальная погрешность, не превышающая 10 %, свидетельствует о достаточно высокой точности определения напряжений. При этом существенным преимуществом ЭМА метода является проведение контроля трубопровода через диэлектрическое покрытие без предварительной зачистки поверхности металла и нанесения контактной смазки.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода оценки технического состояния и остаточного ресурса технологических трубопроводов на основе ЭМА эффекта, устройства и программного обеспечения для реализации этого метода, методики его практического применения. Произведена оценка повышения эксплуатационной безопасности технологических трубопроводов при использовании предлагаемого метода.

Переход к оценке остаточного ресурса в единицах измерения времени или в количестве циклов осуществляется согласно РД 03-421-01 и РД 26.260.004-91, при этом интегральный параметр безопасности  $S$  используется как параметр технического состояния. Предусмотрено использование технологии искусственных нейронных сетей для прогнозирования изменений параметров временных рядов. Нейронная сеть анализирует значения параметра  $S$ , полученные при предыдущих обследованиях через равные промежутки времени, и формирует тренд вероятного изменения данного параметра в будущем через те же интервалы времени

$$S_{(t)}^* = f(S_{(t)}) = f(w_1 S_{(t_1)} + w_2 S_{(t_2)} + w_3 S_{(t_3)} + \dots). \quad (4)$$

Для каждого временного интервала определяется параметр  $S$ , совокупность значений которого (4) анализируется нейронной сетью.

Для реализации предложенного метода разработан программно-аппаратный комплекс, состоящий из устройства и программного обеспечения (рисунок 9).

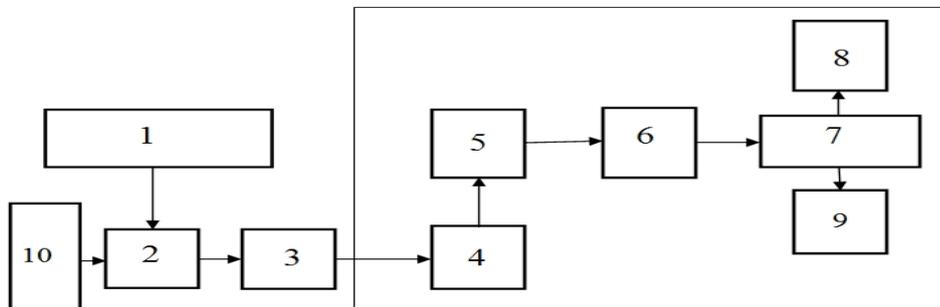


Рисунок 9 – Блок-схема устройства для оценки технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации трубопроводов на основе ЭМА эффекта

Информация о техническом состоянии трубопровода  $10$  в виде параметров сигнала ЭМАП  $2$  проходит предварительную обработку в блоках  $3$  и  $4$  и поступает в блок идентификации  $5$ , где вычисляются коэффициенты полиномов передаточной функции и значения корней характеристического полинома. В блоке искусственных нейронных сетей  $6$  по найденным значениям корней и области заданных эксплуатационных свойств трубопровода определяется его текущее техническое состояние и оценивается остаточный ресурс. В блоке  $8$  хранятся сведения о границах областей

заданных эксплуатационных свойств трубопроводов и результаты их предыдущих обследований. Блок 9 отображает информацию о техническом состоянии и ресурсе обследуемого трубопровода.

Программное обеспечение реализует метод динамической идентификации. По зафиксированной импульсной переходной характеристике ЭМА сигнала рассчитывают коэффициенты полиномов передаточной функции и вычисляют значения корней характеристического полинома.

Для практического применения предложенного метода разработан стандарт СТО УГНТУ–2018 «Методика оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта и динамической идентификации уровня поврежденности металла», который основан на использовании разработанного программно-аппаратного комплекса.

В качестве объекта оценки эффективности предлагаемого метода использовали трубопровод (СтЗсп, длина 7,1 м) установки обезжелезивания и обессоливания нефти. Сравнение вели с ультразвуковым методом контроля (вариант 1) с контактным пьезопреобразователем (ГОСТ Р 55725-2013). При определении частоты разгерметизации трубопровода методом «дерева отказов» оценку вероятности «исходных» событий проводили по значениям, представленным в нормативных документах.

Расчет показателей рисков выполняли в программной среде «PromRisk – расчет риска на производственных объектах» в соответствии с Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утверждена приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009, изменения от 14.12.2010).

На рисунке 10 приведена диаграмма сценария развития аварийной ситуации при разгерметизации трубопровода для случая применения разработанного метода контроля. Значение  $P$  характеризует условную вероятность возникновения события и принимается в соответствии с Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

На рисунке 11 изображены поля потенциального пожарного риска, обусловленного возникновением пожароопасных ситуаций в оборудовании объекта для различных случаев.

Результаты расчетов показывают, что потенциальный пожарный риск при применении бесконтактного ЭМА метода контроля уменьшается на 38,6 % (таблица 1).

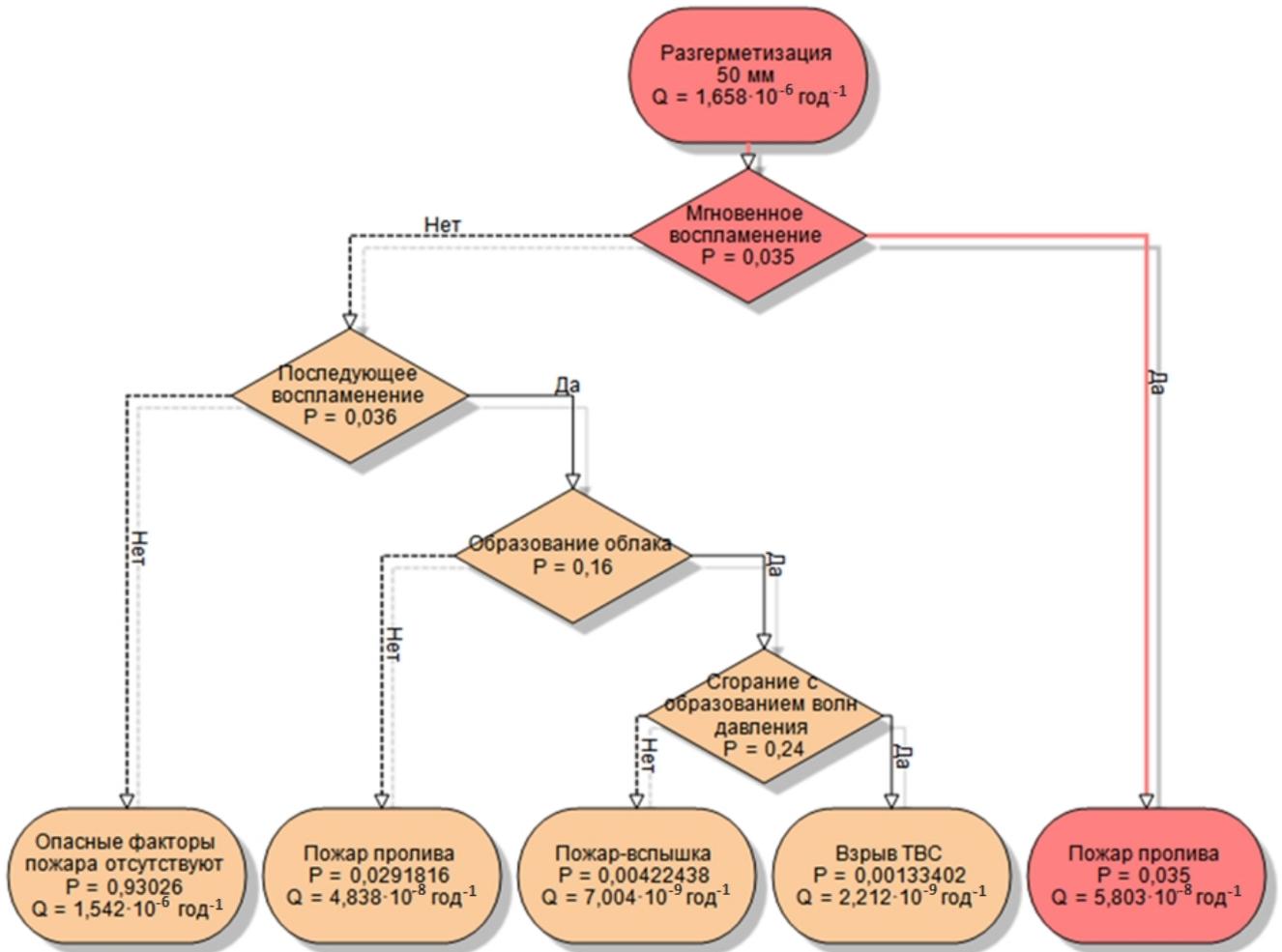
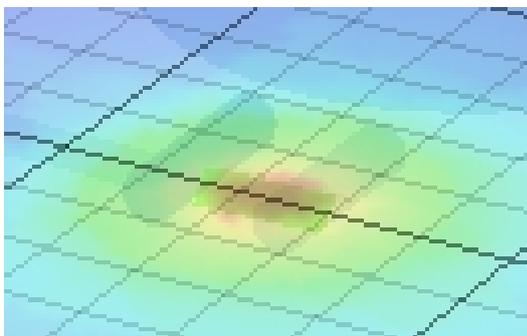
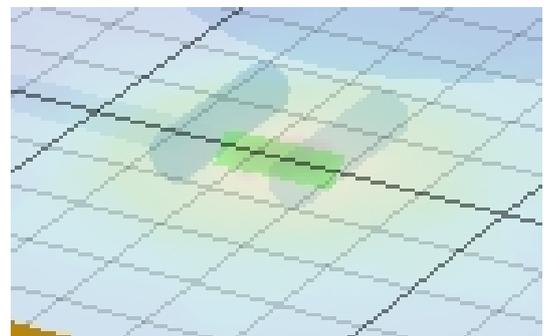


Рисунок 10 – Диаграмма сценария развития аварийной ситуации при применении ЭМА метода



а)



б)

а) ультразвуковой метод контроля; б) бесконтактный ЭМА метод контроля

Рисунок 11 – Поля потенциального пожарного риска

Таблица 1 – Перечень пожароопасных ситуаций и сценариев их развития

Наименование пожаро-опасной ситуации	Сценарий пожаро-опасной ситуации	Частота, год <sup>-1</sup> (вариант 1)	Частота, год <sup>-1</sup> (вариант 2)
Разгерметизация 50 мм	Пожар пролива	$1,151 \cdot 10^{-7}$	$5,803 \cdot 10^{-8}$
Разгерметизация 50 мм	Взрыв топливно-воздушной смеси	$3,224 \cdot 10^{-9}$	$2,212 \cdot 10^{-9}$
Разгерметизация 50 мм	Пожар-вспышка	$1,401 \cdot 10^{-8}$	$7,004 \cdot 10^{-9}$
Разгерметизация 50 мм	Пожар пролива	$5,677 \cdot 10^{-8}$	$4,838 \cdot 10^{-8}$
Значение потенциального пожарного риска		$1,890 \cdot 10^{-7}$	$1,160 \cdot 10^{-7}$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Анализ аварийности технологических трубопроводов нефтегазовой отрасли показал недостаточную эффективность применяемых при проведении экспертизы промышленной безопасности методов оценки и прогнозирования их ресурса. Научно обоснована возможность и перспективность использования для решения данной проблемы электромагнитно-акустического эффекта, позволяющего генерировать в теле трубы акустические волны и опосредованно с помощью передаточной функции считывать достоверную и корректную информацию о его техническом состоянии.

2 Установлено, что изменение в ходе эксплуатации электрических, магнитных и акустических свойств металла трубопровода непосредственно отражается на значениях временных и частотных параметров ЭМА сигнала. Это значительно расширяет информативность ЭМА эффекта по сравнению с традиционным использованием только параметров акустической волны, когда анализу подвергаются лишь акустические свойства стали. Применение передаточной функции - математической модели динамики изменения электрических, магнитных и акустических свойств металла контролируемого локального участка трубопровода – в качестве инструмента прогнозирования остаточного ресурса позволяет повысить достоверность и точность оценки технического состояния данного объекта. Выявлено, что в случае сталей СтЗсп, сталь 10 и 09Г2С наибольшей информативностью обладают акустические сдвиговые волны с радиальной поляризацией: оптимальный зондирующий акустический сигнал имеет длительность 2 мкс с частотой следования 5,1 МГц.

3 Предложен и научно обоснован критерий количественной оценки технического состояния и остаточного ресурса технологических трубопроводов на базе всех параметров передаточной функции, который был назван интегральным параметром

безопасности. Его значения изменяются от 1 до 0 по мере исчерпания ресурса материала трубопровода. При измерении напряжений на модели участка технологического трубопровода с использованием интегрального параметра безопасности максимальная относительная погрешность составила 5,4 %, что согласно ГОСТ Р 55047-2012 свидетельствует о достаточно высокой точности определения напряжений.

4 На уровне изобретения разработан программно-аппаратный комплекс и подготовлена методика оперативного контроля технического состояния и оценки ресурса технологических трубопроводов на основе совместного использования электромагнитно-акустического эффекта и математической модели динамики напряженно-деформированного состояния металла в виде передаточной функции. Оценка степени снижения риска аварии на примере разгерметизации технологического трубопровода установки обезвоживания и обессоливания нефти показала, что применение разработанного метода позволяет снизить значение потенциального пожарного риска на 38 %.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 научных трудах, в том числе:**

**– в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:**

1 Ишмухаметов, В. С. Электромагнитный инденторный метод диагностики нефтегазового оборудования» / В. С. Ишмухаметов, А. Р. Ясафова, И. Г. Хуснутдинова, М. Г. Баширов // Газовая промышленность. – 2013. – № S (700). – С. 44–47.

2 Баширов, М. Г. Электромагнитно-акустический метод оценки технического состояния энергетического оборудования / М. Г. Баширов, И. Г. Хуснутдинова, Л. Г. Хуснутдинова, Д. Р. Усманов // Промышленная энергетика. – 2016. – № 12. – С. 8–13.

3 Хуснутдинова, И. Г. Анализ аварийных ситуаций в нефтегазовой отрасли при возникновении дефектов в металлических элементах оболочковых конструкций / И. Г. Хуснутдинова, М. Г. Баширов, И. К. Бакиров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Вып. 2. – С. 155–164.

4 Хуснутдинова, И. Г. Оценка технического состояния и ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта / И. Г. Хуснутдинова, М. Г. Баширов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 1. – С. 144–162. – URL : [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1\\_2019/ogbus\\_1\\_2019\\_p144-162.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p144-162.pdf)

**– статьи в изданиях, индексируемых в Scopus:**

5 Khusnutdinova, I. G. The use of electromagnetic-acoustic method for estimating the stress-strain state of the metallic elements of power equipment / I. G. Khusnutdinova, M. G. Bashirov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 743. – P. 463–467.

**– в прочих изданиях:**

6 Хуснутдинова, И. Г. Оценка степени поврежденности оболочковых конструкций с использованием электромагнитно-акустического метода контроля / И. Г. Хуснутдинова, М. Г. Баширов, Д. Р. Усманов, Л. Г. Хуснутдинова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10–3. – С. 538–541.

7 Баширов, М. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния и уровня поврежденности металла нефтегазового оборудования / М. Г. Баширов, Д. Р. Усманов, И. Г. Хуснутдинова // *Теоретические и прикладные аспекты современной науки: сб. науч. тр. по матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. : в 6 ч. / Под общ. ред. М. Г. Петровой*. – Белгород, 2015. – Ч. III. – С. 27–29.

8 Репин, П. Г. Электромагнитно-акустический метод контроля напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла технологического оборудования / П. Г. Репин, А. В. Самородов, В. Л. Талаев, Э. М. Баширова, И. Г. Хуснутдинова // *Нефтепереработка и нефтехимия*. – 2018. – № 10. – С. 38–44.

9 Хуснутдинова, И. Г. Анализ снижения рисков эксплуатации технологических трубопроводов при использовании электромагнитно-акустического метода контроля напряженно-деформированного состояния металла / И. Г. Хуснутдинова, М. Г. Баширов // *Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2018: матер. Междунар. науч.-методич. конф.* – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 201-204.

**– патенты и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:**

10 Пат. 169803 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/00 . Устройство для бесконтактного контроля напряженно-деформированного состояния и уровня поврежденности металлических конструкций / Хуснутдинова И. Г., Баширов М. Г., Баширова Э. М., Прахов И. В.; заявитель и патентообладатель Хуснутдинова И. Г. – № 2016150488; заявл. 21.12.2016; опубл. 03.04.2017, Бюл. № 10.

11 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617490 Российская Федерация. Оценка напряженно-деформированного состояния и поврежденности металлических конструкций электромагнитно-акустическим методом / Баширов М. Г., Баширова Э. М. Баширов Р. А., Хуснутдинова И. Г.; правообладатель ФГБОУ ВО «УГНТУ». – Заявл. 07.05.2018; опубл. 25.06.2018.