

На правах рукописи



Савченков Сергей Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
ТОЛЩИНОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ И
ТИПА ПОЧВЕННОЙ КОРРОЗИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ НА ОБРАЗЦАХ-СВИДЕТЕЛЯХ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» и Акционерном обществе «Гипрогазцентр».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Спиродович Евгений Апполинарьевич

Официальные оппоненты: **Сясько Владимир Александрович**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра «Приборостроение», профессор

Кузьбожев Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор,
Филиал общества с ограниченной ответственностью «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, заместитель директора по науке

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «5» декабря 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета . www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Надежность работы подземных магистральных нефтяных или газовых трубопроводов, обычно выполненных из стальных труб, во многом обусловлена работой противокоррозионной защиты, которая обеспечивается антикоррозионными покрытиями и средствами электрохимической защиты (ЭХЗ). По магистральным трубопроводам нефти и газа осуществляют транспорт подготовленного продукта, поэтому основной является коррозия наружной поверхности стенок магистральных нефтегазопроводов (МНГП), прокладываемых и работающих, как правило, в грунтовой среде.

Первичной защитой МНГП является покрытие, в случае нарушения целостности которого, грунтовая среда проникает к металлу трубы, после чего защиту от почвенной коррозии МНГП обеспечивают средства ЭХЗ.

Ключевым параметром, определяющим эффективность противокоррозионной защиты и, в конечном счете, ресурс МНГП, является скорость коррозии, которая определяется как отношение утонения стенки трубы к промежутку времени, за которое оно произошло. Считают, что поддержание скорости коррозии менее 0,1 мм/год является удовлетворительным результатом и обеспечивает безаварийную работу МНГП в течение всего проектного срока службы.

Для дистанционной прогнозной оценки потенциальной (определяемой в приближении, что изоляция разрушена) скорости коррозии подземных МНГП наиболее просто применять резистометрический метод, основанный на измерении электрической проводимости образца-свидетеля, подвергаемого коррозии. Для обеспечения идентичности электрохимических условий, образец-свидетель электрически подключают к трубопроводу и погружают в грунт в околотрубном пространстве.

В настоящее время для периодического контроля технологических показателей МНГП, применяются автоматизированные системы мониторинга технического состояния МНГП, объединяющие сеть контрольно-измерительных пунктов дискретно устанавливаемых на протяжении трассы МНГП и связанных каналами передачи данных. На каждом контрольно-измерительном пункте осуществляется автоматический мониторинг параметров состояния МНГП путем опроса комплекса датчиков, одним из которых является датчик определения скорости коррозии на основе образца-свидетеля. Достоверность данных, поступающих от контрольно-измерительных пунктов, определяется и точностью и функциональностью датчиков, используемых для контроля параметров МНГП, таким образом, актуальной задачей является совершенствование датчиков на основе образцов-свидетелей и разработки более достоверных методов оценки протекающей на них скорости коррозии и применения обоснованных превентивных мероприятий для ее сдерживания.

Степень разработанности темы. Вопросам эффективного регулирования работы средств ЭХЗ и разработки элементов систем

коррозионного мониторинга посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов: Александрова Ю. В., Агинея Р. В., Глазова Н. Н., Запелалова Д. Н., Маршакова А. И., Притула В. В., Теплинского Ю. А., Харионовского В. В., Фатрахманова Ф. К., Спиридовича Е. А., Юшманова В. Н., Paravinasam S., Yang L. и др.

Сегодня в автоматизированных системах мониторинга технического состояния МНГП наиболее часто используется резистометрический способ, по которому измеряется сопротивление образца-свидетеля, который изготавливают либо в виде проволоки, либо тонкой пластины. Однако для подземных МНГП наиболее характерна неравномерная почвенная коррозия, включая коррозию пятнами, язвами и питтингами (точечную), а резистометрический метод удовлетворительно работает только при равномерной коррозии, кроме этого у такого метода есть существенные ограничения по ресурсу чувствительного элемента.

Большой локальностью обладает ультразвуковой (УЗ) акустический эхо-импульсный метод, научные основы которого развиты в работах российских и зарубежных специалистов по УЗ дефектоскопии Ключева В. В., Королёва М. В., Алешина И. П., Приницкого А. А., Вовилкина А. Х., Ермолова И. Н., Потапова А. И., Сясько В. А., Баранова В. М., Мэзона У. Для задач мониторинга равномерной коррозии трубопроводов периодически определяют указанным методом остаточную толщину образца-свидетеля, однако методические основы его применения для систем мониторинга технического состояния МНГП не были разработаны, соответственно для создания устройства оценки скорости и типа неравномерной коррозии методами УЗ толщинометрии необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы. Усовершенствовать методы УЗ толщинометрии для определения типа и скорости коррозионных процессов на образцах-свидетелях, для их последующей реализации в системах дистанционного коррозионного мониторинга подземных магистральных нефтегазопроводов.

Основная идея работы. Выполнение прогнозной оценки скорости коррозии в системе мониторинга технического состояния МНГП, выполняемой посредством физического моделирования коррозионных процессов при помощи образца-свидетеля, имитирующего незащищенный покрытием металл, помещаемый в околотрубное пространство, при помощи системы из совмещенного и раздельно-совмещенного пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), позволяет одновременно определить интегральный параметр (средняя толщина образца-свидетеля) и локальные параметры (ширину и глубину очаговой коррозии).

В работе были поставлены следующие задачи:

- 1) Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований, посвященных оценке скорости коррозии материала труб МНГП и средств их защиты от коррозии.

2) На основе методов УЗ толщинометрии определить совокупность признаков для анализа типа коррозии, разработать алгоритмы зондирования и обработки принятых ДС, конструкцию нового автоматического устройства оценки скорости и типа коррозии для системы мониторинга технического состояния трубопровода, определить необходимые рабочие частоты используемых ПЭП.

3) На основе использования УЗ эхо-импульсных методов сформировать научно-обоснованные технические решения по разработке устройства оценки скорости и типа коррозии на образце-свидетеле, разработать новое устройство и выполнить его апробацию, в рамках которой определить достигнутую точность оценки скорости и типа коррозии.

Методы исследования. Использовался комплексный подход, включающий применение системного анализа, экспериментальных исследований, выполненных на оригинальных стендах с применением поверенного современного оборудования. Основные теоретические результаты получены с использованием классических теорий, описывающих процесс распространения и отражения УЗ волн. Для обработки экспериментальных данных использованы методы математической статистики.

Научная новизна

1) С учетом свойств трубной стали, ожидаемой скорости коррозии и срока службы устройства для оценки скорости коррозии, установлены оптимальные параметры образца-свидетеля (толщина 10-15 мм) и пьезоэлектрических преобразователей (рабочая частота 2-2,5 МГц для совмещенного и 5 МГц для раздельно-совмещенного), применяемых для проведения оценки скорости и типа коррозии подземных трубопроводов.

2) Экспериментально установлено, что распределение отношения диаметров питтингов металла подземных трубопроводов к их глубине имеет нормальный характер, что позволяет применять разработанные по результатам исследований математические модели при оценке размеров локальных коррозионных дефектов.

3) Разработаны критерии и алгоритмы автоматической работы системы из совмещенного ПЭП и раздельно-совмещенного ПЭП, размещенных рядом на поверхности пластины образца-свидетеля, позволяющие осуществлять одновременную дистанционную оценку скорости и типа коррозии протекающего на корродирующей поверхности образца-свидетеля.

Теоретическая и практическая значимость

Раскрыты основные соотношения между параметрами образца-свидетеля, частотой зондирующей УЗ волны, при которых могут быть эффективно выполнены оценки скорости и идентификации типа коррозии на поверхности образца-свидетеля.

Определено, что при эксплуатации магистральных газопроводов типично появление питтинговых коррозионных дефектов, для которых математическое ожидание отношения диаметра d и высоты h равно $d/h=0,471$.

Создана и апробирована конструкция опытного образца нового диагностического ультразвукового датчика для системы мониторинга технического состояния подземного трубопровода, использующая компоненты отечественной элементной базы и разрешенные для средств промышленной диагностики частоты, позволяющая выполнять автоматическую оценку скорости и типа коррозии в течении нескольких лет.

Положения, выносимые на защиту

1. Облучение донной поверхности образца-свидетеля зондирующими УЗ импульсами при помощи совмещенного и раздельно-совмещенного ПЭП позволяет при условии применения соответствующей методики зондирования и обработки результатов оценить текущую толщину образца-свидетеля и условную высоту локальных коррозионных дефектов на его поверхности.

2. Разработанные способ и конструкция реализующего его прибора, обеспечивают с достаточной для практики точностью оценку скорости и типа равномерной и неравномерной коррозии образца-свидетеля, основанные на анализе промежутков времени между излучением зондирующих импульсов и приходом УЗ импульсов ДС, отраженных от корродированной донной поверхности образца-свидетеля, и амплитуды УЗ импульсов ДС, принимаемого совмещенным ПЭП, информация о которой с помощью эмпирически полученных кусочно-линейных уравнений регрессии позволяет оценивать условную ширину локальных коррозионных дефектов в зоне облучения совмещенного ПЭП на донной поверхности.

Степень достоверности результатов подтверждается их согласованностью с общепризнанными представлениями о законах распространения акустических УЗ волн в твердых телах. Экспериментальные результаты подтверждаются их повторяемостью, применением поверенного, сертифицированного оборудования, а также соответствием материала испытываемых образцов, металлу МНГП. Результаты работы подтверждаются результатами практического внедрения и эксплуатации разработанного устройства в составе системы мониторинга технического состояния МНГП.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на: V и VI Международных научно-технических конференциях «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2013, GTS-2015)» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2013, 2015); IX Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2013» (г. Уфа, УГНТУ, 2013); Международном семинаре «Рассохинские чтения» (г. Ухта, УГТУ, 2014, 2015, 2016); VIII Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (Республика Беларусь, г. Новополоцк, ПГУ, 2014); Научно-технической конференции УГТУ (г. Ухта, УГТУ, 2014); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с

международным участием) «Проблемы функционирования систем транспорта» (г. Тюмень, ТюмГНГУ 2014); Межрегиональном семинаре (вебинаре) «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли» (2015, 2016), I Международной научно-технической конференции «Трубопроводный транспорт: теория и практика» (Москва, ВНИИСТ, 2016), XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2017), посвященной 100-летию НГТУ – Нижегородского политехнического института (Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2017 г.).

Соответствие специальности. По своему научному содержанию диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: пункту №3 (разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами), пункту № 4 (разработка методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и глобальных систем экологического мониторинга природных и техногенных объектов.) и пункту № 6 (разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля).

Личный вклад автора в получение результатов работы заключается в постановке задачи, проведении теоретических исследований, разработке методик проведения экспериментальных исследований, стендовых и полевых испытаний, анализе полученных результатов, разработке функциональных и технических требований, а так же алгоритмов работы нового устройства. При выполнении экспериментов, носящих коллективный характер, автору диссертации принадлежала определяющая роль.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 5 статей в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России, патент РФ на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений, содержит 226 страниц текста, включая 96 рисунков, 17 таблиц и 160 наименований в списке литературы.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, сформулированы цель работы, охарактеризованы пути ее решения, задачи диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость положений, выносимых на защиту.

В первой главе представлен анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации, проанализированы задачи систем

дистанционного коррозионного мониторинга как метода борьбы с коррозией на трубопроводном транспорте, рассмотрены методы и средства оценки скорости коррозии, представлен краткий обзор коррозионных ситуаций, возникающих на трубопроводном транспорте, разработаны облик нового устройства определения скорости и типа коррозии и функциональные требования к нему, рассмотрена возможность применения методов и средств УЗ толщинометрии для оценки скорости и типа коррозии.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований коррозионных явлений при помощи УЗ толщиномеров, выполнен синтез нового способа оценки скорости коррозии с определением типа коррозии на основе анализа времени прихода ДС.

В третьей главе даны предложения по модернизации предложенного способа определения скорости и типа коррозии на основе учета информации о величине амплитуды ДС, на основе которых разработан алгоритм работы нового способа оценки скорости и типа коррозии на поверхности образца-свидетеля, ориентированный на автоматический режим работы.

В четвертой главе разработаны технические требования к конструкции устройства, дано описание конструкции устройства, представлены рекомендации по функционированию устройства, описаны результаты апробации и промышленных испытаний разработанного устройства для оценки скорости и типа коррозии, описаны предложения по модификации устройств для определения скорости и типа коррозии для научных исследований коррозионных явлений на трубопроводах.

В заключении представлены основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, **список литературы** включает 147 ссылок на источники, включая 16 опубликованных автором, в **приложении 1** представлено описание метрологического обеспечения метода и устройства, в **приложении 2** даны рекомендации по использованию УЗ устройства для измерения скорости и типа коррозии в составе системы коррозионной защиты МНГП, в **приложениях 3 и 4** представлены акты внедрения результатов работы в ЗАО «Трубопроводные системы и технологии» и ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

Основные результаты работы отражены в защищаемых научных положениях:

1. Облучение донной поверхности образца-свидетеля зондирующими УЗ импульсами при помощи совмещенного и отдельно-совмещенного ПЭП позволяет при условии применения соответствующей методики зондирования и обработки результатов оценить текущую толщину образца-свидетеля и условную высоту локальных коррозионных дефектов на его поверхности.

Скорость коррозии $V_{КОР\ i}$, мм/год, в момент времени T_i определяется как отношение убыли толщины образца-свидетеля Δh_i , мм, являющейся разницей между значениями оценок предыдущей h_{i-1} , мм, и текущей h_i , мм толщины, к промежутку времени между двумя оценками $\Delta T_i = T_{i-1} - T_i$, лет.

Толщину образца-свидетеля h_i , мм, определяют как произведение скорости распространения продольной УЗ волны, возбужденной ПЭП в металле образца-свидетеля, C , м/с, и половины времени прихода ДС, $\Delta\tau_i$, с. Для повышения точности выполняют несколько измерений $\Delta\tau_i$, а толщину образца-свидетеля h_i определяют как усредненное значение.

Для определения средней толщины металлической пластины образца-свидетеля могут быть использованы два метода УЗ толщинометрии: при помощи совмещенного и раздельно-совмещенного ПЭП (см. рисунок 1).

Из-за наличия неровностей границы металл-грунт, вызванных коррозионными дефектами, ДС становится многолучевым, состоящим из нескольких отраженных импульсов. В результате их интерференционного взаимодействия фаза ДС распределена в диапазоне $\Delta\varphi$, который можно определить как: $\Delta\varphi = 4\pi\Delta l/\lambda$, где Δl – толщина неровностей корродирующего слоя, а λ – длина волны в среде, а передний фронт импульса ДС распределен во временном диапазоне $\Delta\tau_{\text{ФР}}$, равном: $\Delta\tau_{\text{ФР}} = 2\Delta l/C$.

Установлено, что зондирующие импульсы, излученные совмещенным

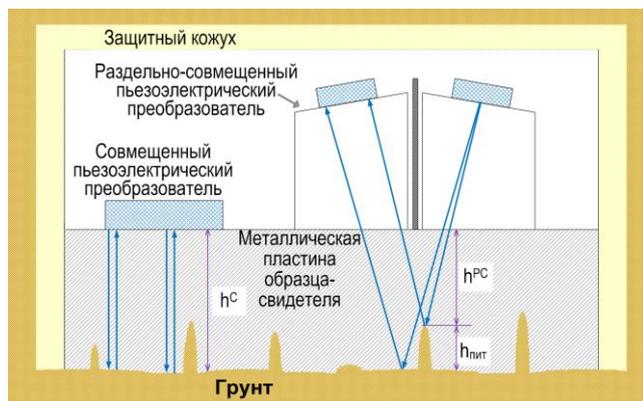


Рисунок 1. Схема датчика устройства для оценки скорости и типа коррозии

ПЭП, слабо отражаются от дефектов с малым диаметром по отношению к длине волны, при этом уровень амплитуды ДС падает с увеличением высоты дефекта. При зондировании раздельно-совмещенным ПЭП на краях дефектов формируется отраженная сферическая волна, уровень амплитуды ДС растет с ростом высоты коррозионного дефекта. Уровень амплитуды ДС увеличивается с ростом диаметра

дефекта по отношению к длине волны зондирующего сигнала.

Исследование задачи зондирования продольной акустической волной шероховатой поверхности показало, что ни один из методов УЗ толщинометрии не может быть непосредственно использован для одновременной оценки параметров коррозионных дефектов и остаточной толщины корродирующего образца-свидетеля.

Для синтеза нового способа был применен комплексный подход, основная идея которого заключалась в том, чтобы использовать одновременно и совмещенный, и раздельно-совмещенный ПЭП, а также разработать методику их работы и обработки результатов зондирования.

Для этого проводились экспериментальные исследования на образцах трубной стали, вырезанных из металла труб магистрального газопровода «Уренгой – Ужгород» (сталь 17Г1С, срок эксплуатации 30 лет) на которых имитировались коррозионные повреждения: равномерная коррозия с помощью травления, локальные коррозионные дефекты (язвы и питтинги) в

виде искусственных цилиндрических отражателей (ИЦО), ось которых перпендикулярна донной поверхности. ИЦО формировались путем сверления углублений различного диаметра (0,5; 1; 2; 3 мм) и глубины (0,2; 1; 3; 5; 7 мм). Зондирование осуществлялось с помощью совмещенного и раздельно-совмещенного ПЭП на частотах: 2,25 МГц, 2,56 МГц, 5 МГц, 4,64 МГц, 5,32 МГц, 9,86 МГц с длинами волн 2,66 мм, 2,34 мм, 1,19 мм, 1,29 мм, 1,13 мм, 0,61 мм.

Для проведения экспериментов использовались сертифицированное и поверенное оборудование: УЗ толщиномер А1210 и УЗ акустический дефектоскоп *Panametrics Epoch LT* и набор стандартных совмещенных и раздельно-совмещенных ПЭП.

При проведении экспериментов учитывалось, что толщина пластины образца-свидетеля должна превышать границу мертвой зоны $h_M = 2,5\lambda$ (тогда можно считать, что реверберационные шумы на порядок слабее ДС). Граница дальней зоны ПЭП учитывается величиной $N_0 = (D_{\text{ПЭП}}^2 - \lambda^2) / (4\lambda)$, после которой распространяющаяся УЗ волна считается плоской.

В результате экспериментов установлено:

- при наличии локальных коррозионных дефектов, диаметр которых был больше половины длины волны, при зондировании обоими ПЭП фиксировалось уменьшение значения толщины пластины образца-свидетеля;
- локальные коррозионные дефекты, диаметр которых был меньше половины длины волны, не определялись обоими ПЭП, при этом фиксировалось тоже значение толщины пластины образца-свидетеля, что и без дефекта;
- при зондировании совмещенными ПЭП различных локальных коррозионных дефектов, имитированных ИЦО, зафиксировано уменьшение амплитуды ДС до величины 30%, эффект наблюдается и при отсутствии фиксации снижения толщины пластины образца-свидетеля;
- зафиксирована лучшая чувствительность по обнаружению локальных коррозионных дефектов имитированных ИЦО при зондировании раздельно-совмещенным ПЭП;
- при зондировании на частоте 10 МГц для фиксирования дефекта имитированного ИЦО требовалось четкое соответствие осей раздельно-совмещенного ПЭП и ИЦО.

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации, включающиеся в следующем:

Металлическую пластину образца-свидетеля целесообразно вырезать из реальной трубы, используемой для строительства трубопровода (исходя из геометрии труб, применяемых для трубопроводов, толщина пластины может составлять 10÷15 мм). Верхняя сторона пластины служит поверхностью ввода, на ней рядом размещаются совмещенный и раздельно-совмещенные ПЭП, противоположная сторона является донной поверхностью и одновременно крышкой кожуха, защищающего ПЭП, и контактирует

с грунтом (рисунок 1). Пластина образца-свидетеля гальванически подключается к системе ЭХЗ.

Совмещенный ПЭП предназначен для определения толщины образца-свидетеля h^C , по величине утонения которой, определенной в моменты времени T_{i-1} и T_i , оценивают скорость коррозии:

$$V_{\text{равн.кор } i} = (h^C_{i-1} - h^C_i) / (T_{i-1} - T_i).$$

Раздельно-совмещенный ПЭП предназначен для обнаружения локальных коррозионных дефектов (язв и питтингов) и ориентирован на определение толщины образца-свидетеля над дефектом h^{PC} . Условную высоту дефекта в момент времени T_i определяют как:

$$h^{\text{ДЕФ}}_i = h^C_i - h^{PC}_i.$$

Признаковое пространство нового способа оценки скорости и типа коррозии представлено в таблице 1.

Таблица 1. Признаковое пространство и правила принятия решений способа оценки скорости и типа коррозии.

Проверяемые гипотезы	0 если = 0; 1 если > 0	Решение
$h^C_{i-1} - h^C_i = \Delta h^C_i > 0$	0	Скорость коррозии равна нулю.
$h^{PC}_{i-1} - h^{PC}_i = \Delta h^{PC}_i > 0$	0	
$h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i > 0$	0	
$h^C_{i-1} - h^C_i = \Delta h^C_i > 0$	1	Наблюдается рост равномерной коррозии, локальной коррозии нет. Скорость коррозии находится по формуле: $V_{\text{равн.кор } i} = \Delta h^C_i / \Delta T_i.$
$h^{PC}_{i-1} - h^{PC}_i = \Delta h^{PC}_i > 0$	1	
$h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i > 0$	0	
$h^C_{i-1} - h^C_i = \Delta h^C_i > 0$	1	Наблюдается рост равномерной коррозии. Скорость коррозии находится по формуле: $V_{\text{равн.кор } i} = \Delta h^C_i / \Delta T_i.$ Наблюдается рост локальной коррозии с условной высотой дефектов: $h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i$, ее скорость оценивается по формуле: $V_{\text{лок.кор } i} = \Delta h^{PC}_i / \Delta T_i$, если $\Delta h^{C-PC}_i \geq 1$ мм, то коррозия питтинговая, если $\Delta h^{C-PC}_i < 1$ мм, то коррозия язвенная.
$h^{PC}_{i-1} - h^{PC}_i = \Delta h^{PC}_i > 0$	1	
$h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i > 0$	1	
$h^C_{i-1} - h^C_i = \Delta h^C_i > 0$	0	Рост равномерной коррозии отсутствует. Наблюдается рост локальной коррозии с условной высотой дефектов: $h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i$, ее скорость оценивается по формуле: $V_{\text{лок.кор } i} = \Delta h^{PC}_i / \Delta T_i.$ Если $\Delta h^{C-PC}_i \geq 1$ мм, то коррозия питтинговая, если $\Delta h^{C-PC}_i < 1$ мм, то коррозия язвенная.
$h^{PC}_{i-1} - h^{PC}_i = \Delta h^{PC}_i > 0$	1	
$h^C_i - h^{PC}_i = \Delta h^{C-PC}_i > 0$	1	

Для устранения помеховых факторов выполняются мероприятия:

- совмещенным ПЭП для снижения чувствительности к дефектам излучаются возможно более низкочастотные зондирующие импульсы, с учетом ограничения мертвой зоны и принятой толщины пластины образца-свидетеля частота излучения 2,5 МГц;
- для совмещенного ПЭП в условиях «размытости» переднего фронта и наличия шумов необходимо устанавливать повышенный порог чувствительности (по крайней мере 0,5 от амплитуды импульса ДС);

- раздельно-совмещенным ПЭП для повышения чувствительности к дефектам должны излучаться более высокочастотные зондирующие импульсы, с учетом того, что в зону контроля должен попасть хотя-бы один питтинг, частота излучения устанавливается 5 МГц;
- учитывая низкую интенсивность ДС, рассеянного одиночным дефектом, необходимо устанавливать низкий порог чувствительности для раздельно-совмещенного ПЭП.

Обработка результатов зондирования двумя ПЭП пластины образца-свидетеля, позволяет оценивать остаточную толщину пластины образца-свидетеля и условную высоту локальных коррозионных дефектов на фоне равномерной коррозии. Этот признак является ключевым в полученном патенте на изобретение РФ № 2536779 «Способ определения скорости коррозии и устройство для его реализации».

Таким образом, первое научное положение можно считать доказанным.

2. Разработанные способ и конструкция реализующего его прибора, обеспечивают с достаточной для практики точностью оценку скорости и типа равномерной и неравномерной коррозии образца-свидетеля, основанные на анализе промежутков времени между излучением зондирующих импульсов и приходом УЗ импульсов ДС, отраженных от корродированной донной поверхности образца-свидетеля, и амплитуды УЗ импульсов ДС, принимаемого совмещенным ПЭП, информация о которой с помощью эмпирически полученных кусочно-линейных уравнений регрессии позволяет оценивать условную ширину локальных коррозионных дефектов в зоне облучения совмещенного ПЭП на донной поверхности.

Представленный выше способ решает задачу одновременной оценки скорости и типа коррозии, однако существенна вероятность того, что локальный коррозионный дефект не будет обнаружен в зоне контроля раздельно-совмещенного ПЭП, что приведет к пропуску момента зарождения локального коррозионного дефекта. Кроме того, описанный выше способ оценки скорости и типа коррозии позволяет дать оценку условной высоты, но не условной ширины дефекта. Поэтому в качестве дополнительного диагностического критерия для оценки условных размеров локальных коррозионных дефектов предлагается применять амплитуду ДС при зондировании совмещенным ПЭП, что в результате позволяет повысить информативность и достоверность такой оценки. Это связано с тем, что оба ПЭП жестко зафиксированы на пластине образца-свидетеля, что позволяет следить за развитием локальных коррозионных дефектов во времени безотносительно к ошибкам позиционирования.

Для изучения влияния изменения условных размеров локальных коррозионных дефектов (язв и питтингов) на амплитуду ДС, излученных совмещенным ПЭП, зондировались локальные дефекты в виде ИЦО. Глубина и диаметр ИЦО менялись от 0,5 до 5,0 мм с шагом 0,5 мм.

Получены экспериментальные зависимости, характеризующие

уменьшение амплитуды первого ДС ΔP , %, с увеличением глубины и диаметра ИЦО, в присутствии равномерной поверхностной коррозии, выполнявшейся травлением (рисунок 2, таблица 2).

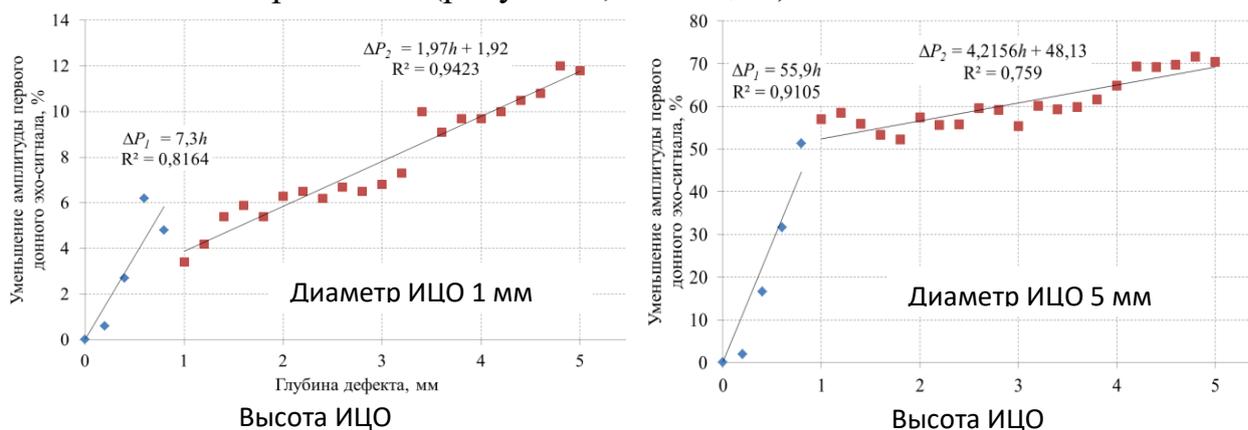


Рисунок 2 – Зависимости изменения амплитуды первого ДС с увеличением глубины искусственных цилиндрических отражателей, имитирующих локальные дефекты (примеры).

Таблица 2 – Изменение амплитуды ДС в присутствии ИЦО, имитирующих локальные дефекты (ΔP_1 – при $h < 0,4\lambda$, ΔP_2 – при $h > 0,4\lambda$)

Диаметр дефекта, мм	Изменение амплитуды	Диаметр дефекта, мм	Изменение амплитуды
0,5	$\begin{cases} \Delta P_1 = 5,47h \\ \Delta P_2 = 2,98h - 4,02 \end{cases}$	3,0	$\begin{cases} \Delta P_1 = 22,93h \\ \Delta P_2 = 3,53h + 19,17 \end{cases}$
1,0	$\begin{cases} \Delta P_1 = 7,3h \\ \Delta P_2 = 1,97h + 1,92 \end{cases}$	3,5	$\begin{cases} \Delta P_1 = 36,78h \\ \Delta P_2 = 4,37h + 26,72 \end{cases}$
1,5	$\begin{cases} \Delta P_1 = 12,61h \\ \Delta P_2 = 2,25h + 7,37 \end{cases}$	4,0	$\begin{cases} \Delta P_1 = 30h \\ \Delta P_2 = 3,7h + 30,87 \end{cases}$
2,0	$\begin{cases} \Delta P_1 = 13,2h \\ \Delta P_2 = 2,88h + 11,87 \end{cases}$	4,5	$\begin{cases} \Delta P_1 = 37,28h \\ \Delta P_2 = 3,9h + 38,11 \end{cases}$
2,5	$\begin{cases} \Delta P_1 = 19,9h \\ \Delta P_2 = 4h + 16,54 \end{cases}$	5,0	$\begin{cases} \Delta P_1 = 55,9h \\ \Delta P_2 = 4,22h + 48,13 \end{cases}$

Установлено, что уменьшение амплитуды первого ДС для всех диаметров ИЦО описывается кусочно-линейной регрессионной функцией, состоящей из двух участков: стремительное падение на первом участке и дальнейшее, более плавное её снижение на втором. Для ИЦО с диаметром $d > 0,4\lambda$ точкой перелома является значение $h \leq 0,4\lambda$, для ИЦО с диаметром $d < \lambda/2$ отмечается смещение точки перелома графика до значений глубины $h \leq \lambda$.

Также установлено, что уменьшение амплитуды первого ДС для разных глубин ИЦО, имитировавших дефекты, происходит стремительнее с увеличением диаметра, при этом на глубинах $h < 0,4\lambda$ падение амплитуды происходит менее стремительно, суммарные потери амплитуды не превышают 40% для максимальных диаметров дефектов. Для второго интервала глубин $0,4\lambda > h > h_{max}$ падение амплитуды ДС с увеличением диаметра ИЦО выражено более ярко, суммарные потери амплитуды превышают 50% для

максимальных диаметров ИЦО.

С учетом того, что минимальные размеры ИЦО, имитирующих локальные дефекты, выявляемого с помощью совмещенного ПЭП, соответствуют половине длины волны, изменение амплитуды ДС необходимо описывать с учетом существования трёх регистрируемых стадий развития дефекта:

- дефекты меньше половины длины волны λ , $d \in (0; d_{min})$ и $h \in (0; h_{min})$;
- дефекты различного диаметра, с глубиной h_{min} , $d \in (d_{min}; d_{max}]$ и $h \in (0; h_{min}]$ (экспериментально установлено для дефектов до $d_{max} = h_{max} = 5$ мм);
- дефекты различного диаметра с глубиной $h \in (h_{min}; h_{max}]$ (экспериментально установлено для дефектов до $d_{max} = h_{max} = 5$ мм).

Для построения экспериментальных зависимостей был использован метод регрессионного анализа, при этом для построения матрицы факторов были приняты значения диаметра d , мм, и глубины h , мм, дефектов, разделенные на три выборки, исходя из ранее выделенных регистрируемых стадий развития дефекта. В ходе анализа экспериментальных данных, ввиду установленного линейного характера связи отклика и факторов, для построения был выбран линейный тип регрессионных зависимостей (моделей):

$$\text{Модель 1: } \Delta P_1 = 1,6d + 3,8h - 0,55, \text{ при } d \in (0; d_{min}) \text{ и } h \in (0; h_{min}); \quad (1)$$

$$\text{Модель 2: } \Delta P_2 = 6,41d + 36,44h - 21,02, \text{ при } d \in (d_{min}; d_{max}] \text{ и } h \in (0; h_{min}); \quad (2)$$

$$\text{Модель 3: } \Delta P_3 = 12,31d + 3,81h - 15,94, \text{ при } d \in (d_{min}; d_{max}] \text{ и } h \in (h_{min}; h_{max}], \quad (3)$$

где ΔP - потери амплитуды первого ДС в присутствии локального коррозионного дефекта, %; d - диаметр локального коррозионного дефекта, мм; h - глубина локального коррозионного дефекта, мм.

Установлено соответствие расчетных значений амплитуды экспериментальным (рисунок 3).

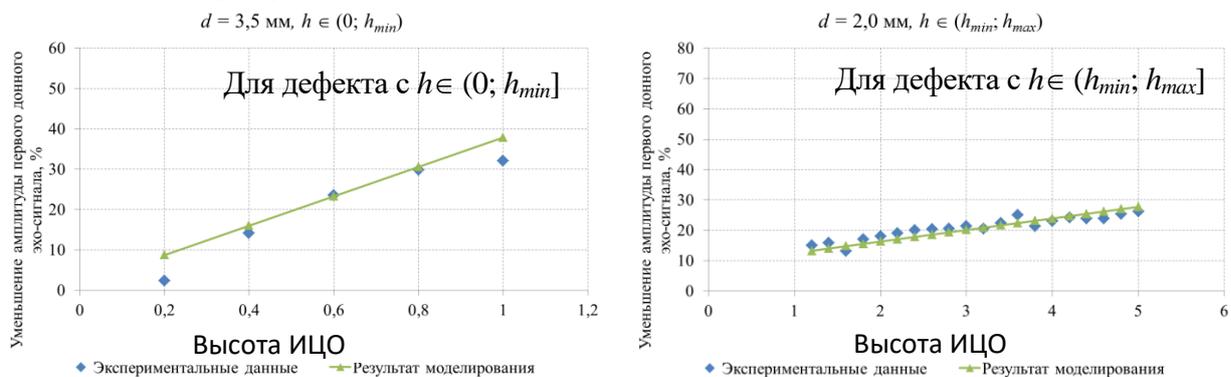


Рисунок 3 – Примеры сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными

Для обоснованного включения разработанных моделей в алгоритм обработки параметров ДС была проведена оценка их адекватности. В качестве критерия адекватности моделей был принят метод анализа регрессионных остатков: если регрессия \hat{y} удовлетворительно описывает истинную зависимость между y и x , то остатки e_i должны быть независимыми нормальными распределенными случайными величинами с нулевым средним, а в значениях e_i должен отсутствовать тренд.

Для решения поставленной задачи использовался способ проверки с

помощью критерия Дарбина - Уотсона (Durbin-Watson statistic), эффективный, в том числе, и для многокритериальных регрессионных моделей:

$$D = \sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2 / \sum_{i=1}^n e_i^2 . \quad (4)$$

Для принятия решения по гипотезе о наличии или отсутствии корреляции остатков выполняется сравнение рассчитанной статистики D с критическими табличными значениями D_1 и D_2 .

По результатам выполненного анализа не подвергается сомнению достоверность третьей экспериментальной модели (3), справедливой для размеров дефектов $d \in (d_{min}; d_{max}]$ и $h \in (h_{min}; h_{max}]$. Эта регрессионная модель (3) может быть использована для вычисления оценки условной ширины дефекта (диаметра питтинга) d на основе ранее полученных оценок величин ΔP_i и $h^{ДЕФ}_i$.

Если раздельно-совмещенный ПЭП не зафиксировал дефект и данных об условной высоте питтинга нет, но зафиксировано уменьшение амплитуды совмещенным ПЭП, необходимо перейти к регрессионной модели с одной переменной. Для этого предложено воспользоваться экспериментальными данными статистической связи между диаметром и высотой питтингов d/h , которые были получены по результатам диагностических обследований 9 магистральных газопроводов и нефтепроводов, выполненных специалистами АО «Гипрогазцентр» в разные годы. Анализ выборки из 4465 значений величины d/h показал, что ее распределение можно считать нормальным с математическим ожиданием $d/h = 0,471$. С учетом этого, построена аппроксимирующая функция (модель) на основе анализа ДС от дефектов с параметрами $d/h \cong 0,471$:

$$\Delta P_4 = 3,5h - 1,3 \quad (5)$$

Точкой перехода от модели (3) к модели (5) является значение условной высоты дефекта h , равное 2,1 мм, близкое к величине длины волны зондирующего сигнала. Такие значения h в экспериментах всегда определялись как разница показаний толщины пластины, измеренной совмещенным и раздельно-совмещенным ПЭП, и уже действовала регрессионная модель (3).

С помощью выражений (3) и (5) было расширено признаковое пространство способа оценки скорости и типа коррозии и разработан алгоритм работы устройства оценки скорости и типа коррозии в автоматическом режиме, представленный на рисунке 4.

Разработанное и изготовленное по заданию в промышленных условиях устройство состоит из датчика и электронного блока, вид которых представлен на рисунках 5 и 6.

С целью апробации нового устройства определения скорости и типа коррозии были проведены стендовые и промышленные испытания, а также выполнена интеграция нового автоматического устройства в состав системы коррозионного мониторинга.

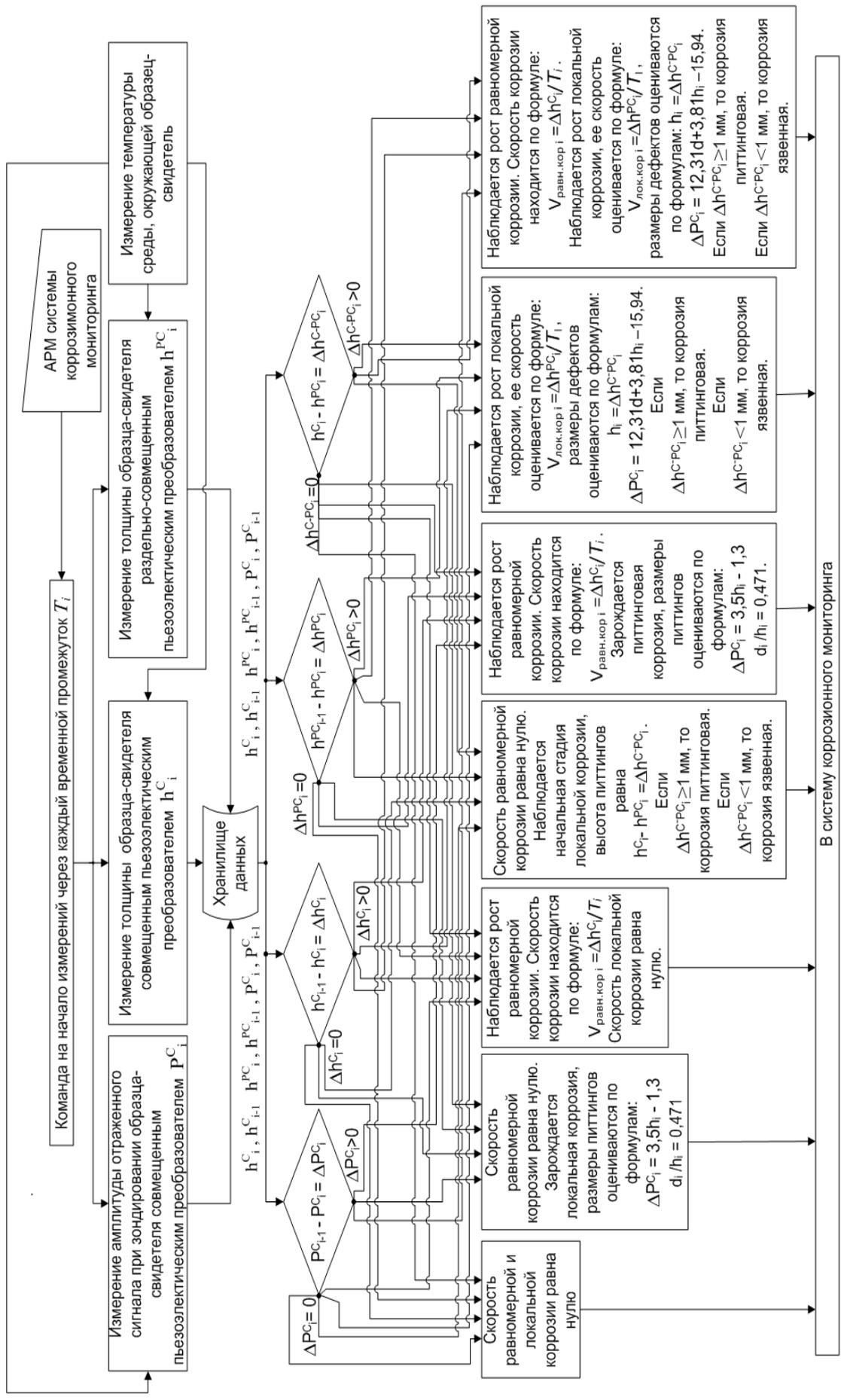
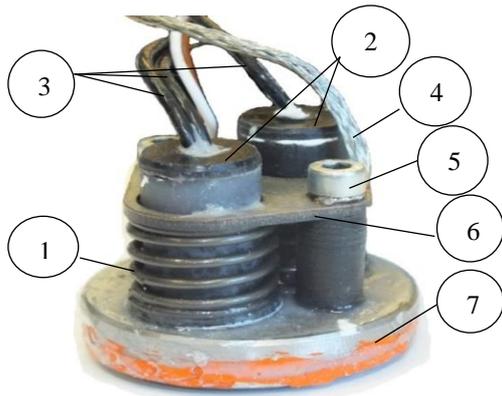


Рисунок 4. Алгоритм работы устройства оценки скорости и типа коррозии



1 – пружина; 2 – преобразователи; 3 – соединительные кабели; 4 – проводник для электрического контакта с трубопроводом; 5 – винт; 6 – коромысло; 7 – образец-свидетель

Рисунок 5. Внешний вид датчика устройства (без оболочки)



1 – датчик; 2 – электронный блок; 3 – соединительные кабели

Рисунок 6. Внешний вид устройства для оценки скорости и типа коррозии

Принцип работы нового устройства проиллюстрирован осциллограммами на рисунках 7 и 8. На левой части осциллограмм отображена работа канала с раздельно-совмещенным ПЭП, в правой половине осциллограммы отображается результат зондирования совмещенным ПЭП.

Для малых дефектов (см. рис. 7) время прихода первых ДС в обоих каналах одинаково и равно $\Delta\tau_1$.

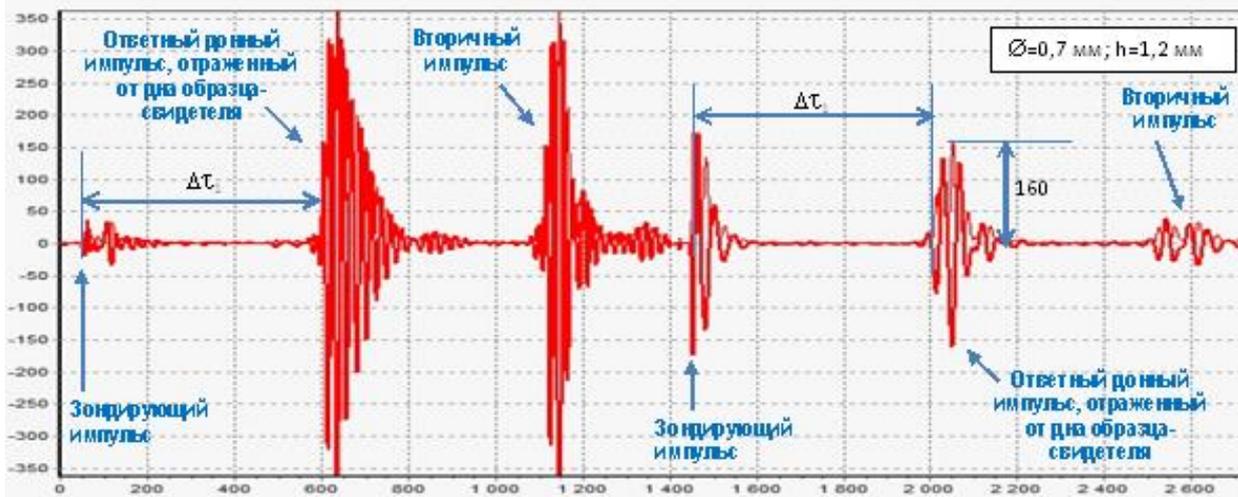


Рисунок 7. Реальные осциллограммы УЗ сигналов в образце-свидетеле с малыми, нечувствительными дефектами

Для достаточно-больших ИЦО, имитирующих локальные дефекты (см. рис. 8) время прихода первого ДС в канале раздельно-совмещенного ПЭП уменьшается до величины $\Delta\tau_2$. Следует отметить, что вслед за полезным первым ДС на вход приемного раздельно-совмещенного ПЭП приходит основной ДС, отраженный от донной поверхности пластины образца-свидетеля, что хорошо наблюдается на рисунке 8.

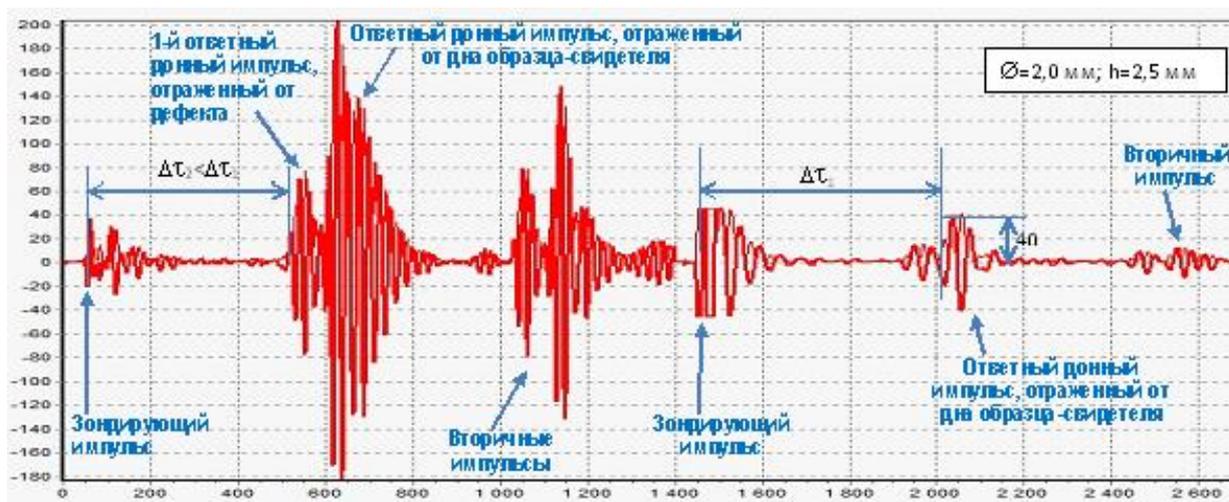


Рисунок 8. Реальные осциллограммы УЗ сигналов в образце-свидетеле с дефектами

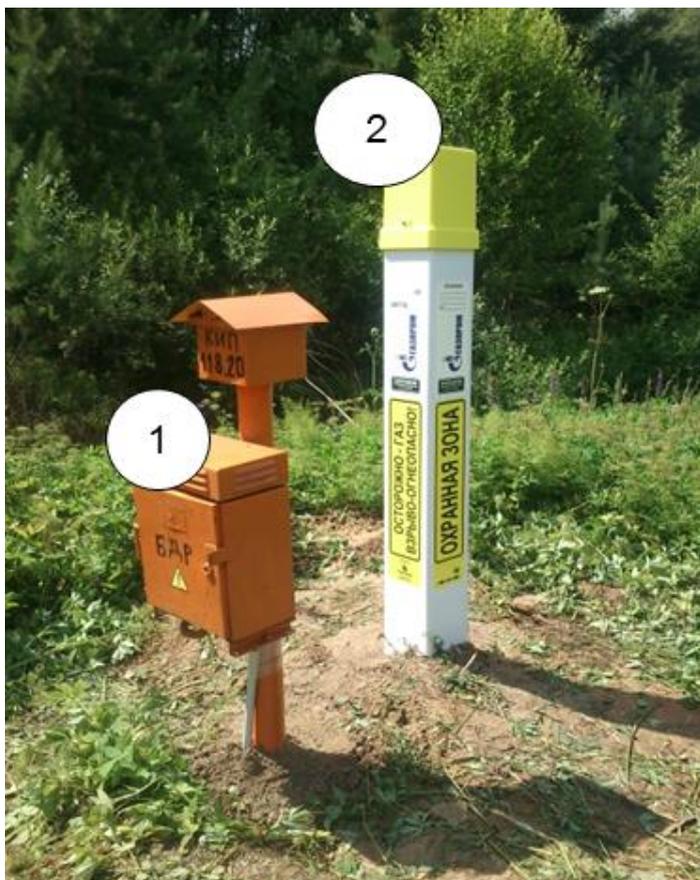
Измерения в канале совмещенного ПЭП соответствуют начально - измеренному значению Δt_1 , при этом требуется использовать высокий (по крайней мере, половина амплитуды) порог чувствительности. Отметим, что амплитуда отраженного ДС в этом канале уменьшилась в 4 раза.

Испытания устройства проводились на действующем участке магистрального газопровода «Саратов – Горький», находящегося в зоне ответственности ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», Арзамасское ЛПУМГ. Диаметр трубопровода – 720 мм. Расположение разработанного устройства определения скорости и типа коррозии в составе системы коррозионного мониторинга при испытаниях представлено на рисунке 9.

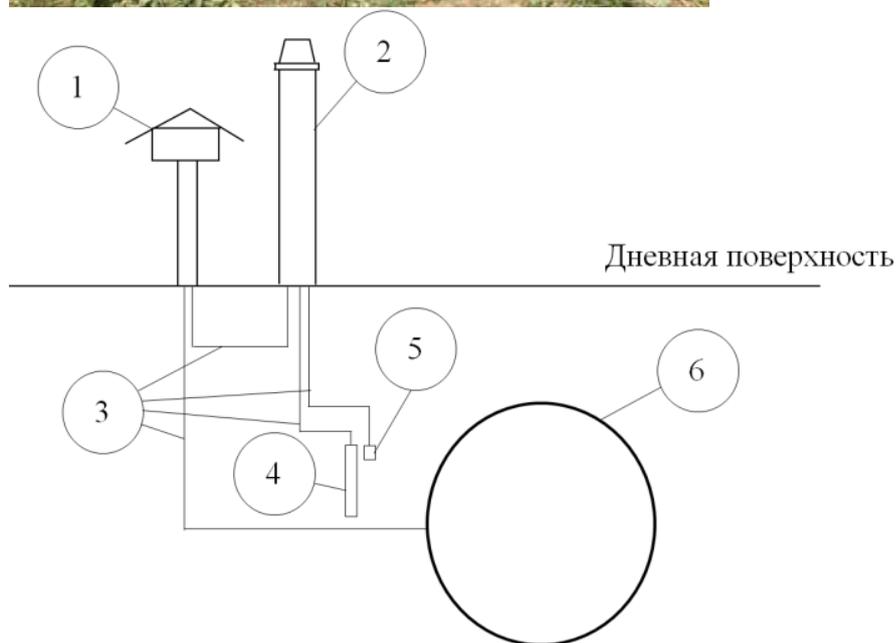
Стендовые и полевые испытания показали, что разработанное устройство обеспечивает хорошую точность оценки скорости коррозии (расхождение с эталонными измерениями гравиметрическим методом составило 2,3%, а испытания устройства на действующем магистральном газопроводе показали отклонение значений скорости коррозии от зафиксированных щуповым методом 6,25%), что является удовлетворительным для практики эксплуатации систем коррозионного мониторинга МНГП результатом.

При испытаниях определена рекомендуемая периодичность выполнения оценок скорости коррозии. Статистический анализ показал, что при определении скорости коррозии с экспозицией 14 суток обеспечивается корректность оценок, а при измерениях за период 60 суток обеспечивается их статистическая достоверность.

Таким образом, второе научное положение можно считать доказанным.



а) – вид контрольно-измерительного пункта



б) – схема расположения оборудования.

Рисунок 9. Расположение разработанного устройства определения скорости и типа коррозии в составе системы коррозионного мониторинга при испытаниях.

1 – штатный контрольно-измерительный пункт; 2 – установленный контрольно-измерительный пункт системы коррозионного мониторинга; 3 – соединительные провода; 4 – электрод сравнения; 5 – датчик устройства для оценки скорости и типа коррозии; 6 – газопровод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты и выводы заключаются в следующем:

- 1.** Показано, что для автоматизированных систем коррозионного мониторинга МНГП требуется способ оценки скорости коррозии, позволяющий дистанционно определять в автоматическом режиме скорость коррозионного процесса и одновременно тип коррозии на образце-свидетеле, помещенном в околотрубное пространство. Этот способ целесообразно искать на основе совершенствования методов УЗ акустической толщинометрии.
- 2.** Исследована специфика процессов при зондировании корродирующей донной поверхности образца-свидетеля совмещенным и отдельно-совмещенным ПЭП, показано, что зондирование совмещенным ПЭП целесообразно применять для интегральных оценок средней толщины корродирующей пластины образца-свидетеля, а зондирование отдельно-совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем для оценок глубины локальных коррозионных дефектов.
- 3.** Определены основные соотношения между параметрами образца-свидетеля, частотой зондирующей УЗ волны, при которых могут быть эффективно выполнены оценки скорости и идентификации типа коррозии на поверхности образца-свидетеля, на основе которых предложена конструкция и методика работы нового устройства для автоматической оценки скорости и типа коррозии в виде системы из совмещенного ПЭП и отдельно-совмещенного ПЭП, размещенных рядом на поверхности пластины образца-свидетеля.
- 4.** Исходя из марок, применяемых для строительства трубопроводов сталей, реальной скорости коррозии, срока службы трубопровода, размеров дефектов и кучности их расположения рекомендовано использовать для совмещенного пьезоэлектрического преобразователя частоту зондирования порядка 2,5 МГц, а для отдельно-совмещенного пьезоэлектрического преобразователя - 5 МГц.
- 5.** Показано, что анализ промежутков времени между излучением зондирующих импульсов и приходом УЗ импульсов ДС, отраженных от корродированной донной поверхности образца-свидетеля при зондировании совмещенным и отдельно-совмещенным ПЭП позволяет определить совокупность признаков для определения оценок средней толщины корродирующей пластины образца-свидетеля и условной глубины локальных коррозионных дефектов, на основе которых сформировать критерии и признаковое пространство, для автоматического алгоритма одновременной оценки скорости и типа коррозии.

6. Показано, что анализ промежутков времени между излучением зондирующих импульсов и приходом УЗ импульсов ДС, отраженных от корродированной донной поверхности образца-свидетеля, и амплитуды УЗ импульсов ДС, принимаемого совмещенным ПЭП, информация о которой с помощью эмпирически полученных кусочно-линейных уравнений регрессии позволяет оценивать условную ширину локальных коррозионных дефектов зоне облучения совмещенного ПЭП на донной поверхности.

7. Определено, что при эксплуатации магистральных газопроводов типично появление питтинговых коррозионных дефектов, для которых математическое ожидание отношения диаметра d и высоты h равно $d/h=0,471$.

8. Разработанные алгоритмы автоматической дистанционной оценки скорости и типа коррозии реализованы в новом автоматическом устройстве, которое интегрировано в состав автоматизированной системы коррозионного мониторинга. Устройство адаптировано к работе в составе системы коррозионного мониторинга. Лабораторные и промышленные испытания устройства показали, что отклонение оценки скорости коррозии по отношению к значениям, измеренным эталонными методами – гравиметрическим и шуповым, не превысило 2,3% и 6,25%, соответственно, что является удовлетворительным для практики эксплуатации систем коррозионного мониторинга МНГП результатом. Разработанное устройство успешно прошло промышленные испытания на магистральном газопроводе «Саратов-Горький», запущено в серию и выпускается ЗАО «Трубопроводные системы и технологии» для применения на объектах ПАО «Газпром».

9. Определены минимальная периодичность проведения оценок скорости коррозии (14 суток), при которой обеспечивается их корректность, и рекомендуемая периодичность проведения оценок скорости коррозии (60 суток), при которой обеспечивается их статистическая достоверность.

Таким образом, в диссертационном исследовании на основе изучения закономерностей временных и амплитудных параметров УЗ акустических импульсов, отраженных от корродированной донной поверхности образца-свидетеля от параметров зондирующих сигналов и материала образца-свидетеля, усовершенствованы методы УЗ толщинометрии для определения типа и скорости коррозионных процессов на образцах-свидетелях. Это позволило сформировать научно-обоснованные технические решения, примененные при разработке автоматического устройства, позволяющего выполнять прогнозные оценки скорости и типа коррозии для систем мониторинга технического состояния МНГП, применяющихся в ПАО «Газпром».

Список трудов по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК

- 1) **Савченков, С. В.** Системно-методические аспекты интеллектуального мониторинга состояния магистральных газопроводов / С. В. Савченков, А. В. Реунов, Е. Л. Карнавский, Ю. М. Свердлик, В. М. Цыс, В. Г. Баранов, В. Р. Милов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – №7. – 2013. – С. 52-58.
- 2) **Савченков, С. В.** Диагностирование возникновения и развития локальных коррозионных дефектов стационарными ультразвуковыми измерителями скорости коррозии / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович, А. Ю. Михалев, Р. В. Агинец // Контроль. Диагностика. – №3. – 2015. – С. 39-43.
- 3) **Савченков, С. В.** Зеркально-теневой метод ультразвукового контроля систем коррозионного мониторинга магистральных трубопроводов / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – №6. – 2015. – С. 9-13.
- 4) **Савченков, С. В.** Оценка размеров локального коррозионного дефекта ультразвуковым методом по значениям амплитуды донного эхо-сигнала / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович, А. Ю. Михалев, Р. В. Агинец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – №2. – 2015. – С. 32-35.
- 5) **Савченков, С. В.** Лабораторные испытания устройства для оценки скорости коррозии / С. В. Савченков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – №4. – 2015. – С. 3-6.

Патент РФ на изобретение

- 6) Патент РФ 2536779 Способ определения скорости коррозии металлических сооружений и устройство для его реализации / Агинец Р. В., Пужайло А. Ф., **Савченков С. В.**, Спиридович Е. А., Михалев А. Ю. ; патентообладатель – ОАО «Гипрогазцентр»; заявл. 19.09.2013 ; опубл. 27.12.2014 ; бюл. №36.

Публикации в журналах и научно-технических сборниках

- 7) **Савченков, С. В.** Разработка акустических датчиков скорости коррозии системы дистанционного мониторинга / С. В. Савченков, Р. В. Агинец, А. Ю. Михалев // Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2013), Москва, 29-30 октября 2013 г. ; в 2 частях ; часть 2 – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2013. – С. 91-101.
- 8) **Савченков, С. В.** Дистанционная оценка скорости и вида коррозии подземных газопроводов ультразвуковым методом / С. В. Савченков, А. Ю. Михалев // Материалы IX Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2013», – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 122-123.
- 9) **Савченков, С. В.** Экспериментальная оценка влияния размеров локального дефекта на результаты толщинометрии металла труб / С. В. Савченков, А. Ю. Михалев, А. В. Голобородько // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (22-25 апреля 2014 г.) ; в 3 ч. ; ч. 1 – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 152-155.
- 10) **Савченков, С. В.** Алгоритм определения вида коррозионного дефекта и оценки скорости его развития акустическим датчиком / С. В. Савченков,

Р. В. Агинец // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (6-7 февраля 2014 года); в 2 ч.; ч. 2.– Ухта: УГТУ, 2014. – С. 7-10.

11) **Савченков, С. В.** Применение ультразвуковых устройств оценки скорости коррозии систем дистанционного коррозионного мониторинга для определения размеров локальных коррозионных дефектов / С. В. Савченков // Сборник тезисов VIII Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (25-28 ноября 2014 года) – Новополюцк: ПГУ, 2014. – С. 90-91.

12) **Савченков, С. В.** Исследование изменения амплитуды донных эхосигналов при неоднородном распределении локальных коррозионных дефектов на отражающей поверхности / С. В. Савченков, А. Ю. Михалев, // Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с международным участием) «Проблемы функционирования систем транспорта» (5–7 ноября 2014 г.). Т. 2. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – С. 75-79.

13) **Савченков, С. В.** Проверка адекватности экспериментальных моделей алгоритма обработки первичной информации, получаемой ультразвуковым измерителем скорости коррозии / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (5-6 февраля 2015 года); в 2 ч.; ч. 2.– Ухта: УГТУ, 2015. – С. 102-105.

14) **Савченков, С. В.** Разработка алгоритмического обеспечения ультразвукового устройства для оценки скорости коррозии / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович // Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2015), Москва, 28-29 октября 2015 г. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2015. – С. 134.

15) **Савченков, С. В.** Оценка влияния внешних факторов на работоспособность ультразвукового устройства для оценки скорости коррозии / С. В. Савченков, Е. А. Спиридович // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (4-5 февраля 2016 года); в 2 ч.; ч. 1.– Ухта: УГТУ, 2016. – С. 229-232.

16) **Савченков, С. В.** Функциональные требования к новому датчику определения скорости коррозионного процесса в автоматизированной системе мониторинга технического состояния подземного трубопровода/С. В. Савченков, Е. А. Спиридович // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2017), 21 апреля 2017 г., Нижний Новгород.

17) **Савченков, С. В.** Определение скорости и типа коррозии на поверхности образца-свидетеля методами ультразвуковой толщинометрии / С. В. Савченков // Научный поиск №3, 2018, с.69-74.