

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности
(наименование института полностью)

20.04.01 Техносферная безопасность
(код и наименование направления подготовки)

Управление промышленной безопасностью, охраной труда и окружающей среды в
нефтегазовом и химическом комплексах
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Современные высокоэффективные покрытия для защиты объектов нефтегазовой отрасли

Обучающийся	<u>Д. Р. Атнагулова</u> (Инициалы Фамилия) _____ (личная подпись)
Руководитель	<u>к.х.н., доцент, И. А. Сумарченкова</u> (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)
Консультант	<u>к.э.н., доцент, Т.Ю. Фрезе</u> (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Содержание

Введение.....	3
Термины и определения	5
Перечень сокращений и обозначений.....	6
1 Основные виды антикоррозионных покрытий, используемые для защиты объектов нефтегазового комплекса.....	8
1.1 Основные виды и типы коррозии металлов, возникающие при эксплуатации оборудования и трубопроводов в нефтегазовой отрасли.....	8
1.2 Виды антикоррозионных покрытий, используемые для защиты оборудования и трубопроводов в нефтегазовом комплексе	9
2 Анализ коррозионного состояния оборудования и трубопроводов на исследуемом объекте в нефтегазовой отрасли.....	24
2.1 Методы неразрушающего контроля, используемые для определения коррозионного состояния оборудования и трубопроводов исследуемого объекта.....	24
2.2 Идентификация дефектов по результатам неразрушающегося контроля на исследуемом объекте	46
3 Разработка мероприятий по снижению воздействия коррозии на оборудование и трубопроводы в нефтегазовой отрасли на исследуемом объекте.....	51
3.1 Выбор высокоэффективных покрытий для защиты оборудования и трубопроводов от коррозии в нефтегазовой отрасли.....	51
3.2. Анализ и оценка эффективности предлагаемых мер по обеспечению техносферной безопасности.....	60
Заключение	66
Список используемых источников.....	68

Введение

Актуальность и научная значимость нашего исследования состоит в повышении квалификации при изучении применяемого оборудования, необходимого для защиты различных объектов нефтегазовой отрасли от коррозионных процессов и соответствующих проявляющихся дефектов, полученные результаты могут служить рекомендацией другим предприятиям Самарской области.

Объект исследования: Объекты нефтегазовой отрасли.

Предметом исследования является современные высокоэффективные покрытия для защиты объектов нефтегазовой и химической отраслей.

Целью диссертационного исследования является повышение надежности и безопасности при эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли путем применения современных высокоэффективных покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотрение видов и механизмов возникновения коррозии;
- изучение современных защитных покрытий в нефтегазовой отрасли, а так же методов неразрушающего контроля;
- анализ международной ситуации по теме коррозии на оборудовании и трубопроводах нефтегазовой отрасли;
- разработка мероприятий по снижению воздействия коррозии на объектах нефтегазовой отрасли.

Гипотеза исследования состоит в том, что для предприятий нефтегазовой промышленности подобрать способ защиты объектов от коррозии, тем самым снизить процент появления коррозионных дефектов.

Теоретико-методологическую основу исследования составили статистические данные исследований коррозии объектов нефтегазовой отрасли.

Методы исследования: анализ коррозионного состояния объектов нефтегазовой области.

Опытно-экспериментальная база исследования: Нефтеперерабатывающие заводы России.

Научная новизна исследования заключается в разработке мероприятий по снижению воздействия коррозии на оборудовании и трубопроводах в нефтегазовой области.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в разработке мероприятий по снижению воздействия коррозии на оборудовании и трубопроводах в нефтегазовой области.

Достоверность и обоснованность результатов: выполнен анализ результатов предприятий по исследованию объектов нефтегазовой отрасли на возникновение и рост коррозии и появления коррозионных дефектов.

Личный вклад автора в проведение ряда экспериментальных работ согласно матрице экспериментов с последующей разработкой рекомендаций и усовершенствовании составов.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования.

Основные результаты исследования представлены в следующих публикациях:

- Атнагулова Д.Р. Современные высокоэффективные покрытия. Оценка эффективности и пути совершенствования // Научный журнал «Обществознание и психология». №4 (48), март, 2023 г.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, 3 глав (разделов), заключения, содержит 11 рисунков, 9 таблиц, список используемой литературы (52 источника). Основной текст изложен на 74 страницах.

Термины и определения

В настоящем отчете применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Коррозия под напряжением — коррозия, вызываемая одновременное воздействие коррозии на окружающую среду и механические напряжения. Если это напряжение растягивающее, может быть растрескающийся металл. Это чрезвычайно опасная коррозия, особенно в конструкциях, которые испытывают механическую нагрузку (оси, рессоры, автоклавы, паровые котлы, турбины и т.д.).

Коррозия — это ухудшение свойств материалов из-за взаимодействия с окружающей средой и материалами, например, металлы и сплавы, неметаллы, древесину, керамику, пластмассы и композиты.

Диагностика коррозионного состояния – это получение информации о наличии дефектов, ее систематизация и хранение в компьютерном банке данных.

Поверхностный эффект, скин-эффект — эффект снижения амплитуд электромагнитной волны при проникновении в глубину проводящего пространства.

MR - датчики магнитного поля, которые используются для чтения данных в жесткие диски, биосенсоры, микроэлектромеханические системы (MEMS) и другие устройства.

Электрохимическая защита оборудования и сооружений из металлов — является комплексом мероприятий, направленных на предотвращение коррозии, поддержание работоспособности защитных объектов в процессе эксплуатации.

Перечень сокращений и обозначений

В настоящем отчете применяются следующие сокращения:

ИСО – международная организация, занимающаяся выпуском стандартов.

ФЗ – нормативные правовые акты высшей юрисдикции в отношении иных нормативных правовых актов, содержащие первоначальные нормы прав, принятые в соответствии с установленным порядком Федерального закона Российской Федерации или путем всеобщего голосования по этому вопросу.

РФ – Российская Федерация.

ФС – Федеральное собрание.

ЕЭК – Евразийская экономическая комиссия .

ГОСТ – Межгосударственный стандарт.

MRP – это расчет потребности в материалах на основании фактического требования компонентов и прогноза спроса на уровне компонентов.

СССР – Союз Советских Социалистических Республик.

ОСТ – это свод нормативных документов, регламентирующих производство продукции для узких отраслей.

ПАВ – поверхностно – активные вещества.

ПР – преобразователи ржавчины.

ПКЗ – противокоррозионная защита.

МВТ – микроволновая термография.

УЗК – ультразвуковой контроль.

НК – неразрушающий контроль.

ПК – персональный компьютер.

КД – коррозионные дефекты.

ЭХЗ – электрохимзащита.

МТ – магистральные трубопроводы.

АТ – активная термография.

ПТ – пассивная термография.

АЭ – акустическая эмиссия.

ВК – вихревые течения.

ГГц – гигагерц.

ТГц – терагерцовая технология.

МНК – микроволновый неразрушающий контроль.

МРТ – магнитнопорошковый дефектоскоп.

MFL – утечка магнитного потока.

SAR – микроволновый радар с синтезированной апертурой.

ВТД – внутритрубная диагностика.

ВЭТ – импульсные вихревые токи.

ВИП – внутритрубные инспекционные приборы.

НАСА - Независимое агентство, относящееся к федеральному правительству США и подчиняющееся непосредственно президенту США.

1 Основные виды антикоррозионных покрытий, используемые для защиты объектов нефтегазового комплекса

1.1 Основные виды и типы коррозии металлов, возникающие при эксплуатации оборудования и трубопроводов в нефтегазовой отрасли

Металлы, которые используются в нашей повседневной жизни - ковкие, прочны и пластичны. При ежедневном использовании, они вступают в контакт с окружающей средой, тем самым со временем, теряя свой блеск и покрываются цветным слоем [7].

Необходимо не забывать, что некоторые металлы теряют свою прочность и становятся хрупкими. Благодаря этому происходит химическая реакция между металлами и окружающей их средой. Поэтому разрушение металлов вследствие взаимодействия с окружающей средой называется коррозией.

Обычно это видно на внешней поверхности металла. Во время коррозии обнажается верхний слой металла, а также его внутренняя поверхность. В результате коррозия имеет тенденцию распространяться на всю глубину металла.

Это тип электрохимической коррозии, при котором один металл легче подвергается коррозии при контакте с другим, особенно в присутствии электролита. При этом типе коррозии на верхней поверхности металла обычно образуются глубокие впадины и канавки [5].

Отличным примером такой коррозии является соприкосновение меди со сталью в среде соленой воды. Другим хорошим примером является то, что когда алюминий и углеродистая сталь соединяются и погружаются в морскую воду, алюминий быстро подвергается коррозии, а сталь остается безопасной.

Этот распространенный тип коррозии приводит к равномерной потере металла с непокрытой поверхности из-за воздействия агрессивной среды на всю металлическую поверхность. В результате металл становится тоньше и в конечном итоге выходит из строя.

Одним из положительных моментов является то, что эта коррозия оказывает относительно незначительное влияние на эксплуатационные характеристики материала.

Часто это происходит из-за трения быстродействующей жидкостью. Жидкость может быть абразивной, а может и не быть. Например, цинк и сталь, смоченные в разбавленной серной кислоте, равномерно растворяются на их поверхности.

Коррозионное растрескивание под напряжением — это образование трещин на материале в агрессивной среде. Данное явление может привести к внезапному разрушению пластичных металлических сплавов, подверженных растягивающим нагрузкам, особенно при высоких температурах.

Стойкий сплав обладает высокой химической специфичностью, поскольку остальные различные сплавы могут подвергаться коррозионным процессам только при воздействии химических сред.

Отличным примером такой коррозии является коррозионное растрескивание аустенитной нержавеющей стали под напряжением в растворе хлорида.

Щелевая коррозия относится к коррозии, возникающей в пространствах, таких как зазоры, в которых задерживается стабильный раствор и не обновляется. Эти пространства обычно называются щелями. Эта коррозия обычно возникает там, где болты и гайки образуют внахлест, что может привести к появлению трещин.

Примерами областей, где может возникнуть щелевая коррозия, являются прокладки, нижние поверхности шайб и головки болтов. Алюминиевые сплавы и нержавеющая сталь также могут подвергаться щелевой коррозии. Это происходит из-за образования дифференциальной

аэрационной ячейки, которая приводит к образованию ржавчины внутри трещин.

Точечная коррозия - это экстремальная коррозия, которая приводит к случайному образованию крошечных пор в металле. Это происходит в локальной точке на металле и перемещается с образованием коррозионной ячейки, окруженной поверхностью металла.

При воздействии на углеродистую сталь концентрированной серной кислоты пузырьки водорода отщепляют пленку сульфата железа от стенки трубы, образуя водородные канавки.

Этот тип коррозии образуется в трубопроводах в виде канавок из-за взаимодействия коррозионного агента, изготовленных компонентов трубы и пузырьков водорода. Эти пузырьки обычно разрушают защитное покрытие при контакте с материалом.

Как следует из названия, этот тип коррозии возникает на большинстве металлов из-за перегрева. Высокотемпературная коррозия возникает, когда газовые турбины, дизельные двигатели, печи или другое оборудование вступают в контакт с горячим газом, содержащим специфические загрязняющие вещества.

Горячая атмосфера, содержащая такие газы как кислород, сера и другие соединения, может привести к химическому разложению металла. Эти соединения могут легко окислять металлы. Например, в автомобильных двигателях используются металлы, которые должны выдерживать длительные периоды высоких температур в среде, содержащей агрессивные продукты сгорания.

При графитной коррозии металлические компоненты труб из серого чугуна выщелачиваются или превращаются в продукты коррозии, оставляя графит неповрежденным. Кроме того, некоторые виды чугуна разрушаются при слишком длительном нахождении в соленой воде или кислоте. При такой коррозии графит остается на своем месте, в результате чего металл становится мягким и ослабленным.

Микробная коррозия вызывается присутствием или активностью микроорганизмов в биопленке на поверхности коррозионного материала. Коррозионным материалом может быть либо металл, такой как сталь, либо неметалл, такой как бетон. Этот тип коррозии может поражать как металлические, так и неметаллические материалы, независимо от того, присутствует кислород или нет.

Это разрушительный тип коррозии, который возникает, когда чувствительные материалы подвергаются воздействию сред с высоким содержанием углерода, включая синтез-газ. Ржавчина определяется как разрушение металлического порошка из сыпучих материалов.

Процесс коррозии происходит, когда монооксид углерода (CO) в виде графитового слоя осаждается на поверхности металлов. По мере роста графитового слоя он обычно образует метастабильные частицы, которые имеют тенденцию удаляться от поверхности металла, вызывая образование металлической поверхности.

Процесс покрытия железных пластин оловом или покрытия паяльника припоем перед его использованием известен как лужение. Любой тип металла, и в основном листовой, изготавливается из антикоррозионного материала методом лужения. Эти металлы промывают и помещают в кислоты, состоящие из воды и соли.

После этого их опускают в раствор расплавленного олова. В случае листов они пропускаются через ролики, чтобы удалить лишнюю жечь. Для других работ олово распределяется поверх них. Для сушки листов и других работ, а также для придания им блеска древесную пыль растирают с помощью движущихся барабанов. Таким образом, металлы и листы выглядят красиво.

Из всех видов методов предотвращения коррозии покраска является наиболее популярным методом. Сначала правильно очищается металлическая поверхность, затем с помощью кисти или пульверизатора наносится лак, смешанная краска или эмаль.

Эта краска или эмаль образует слой на поверхности изделия и в значительной степени способствует его антикоррозийной обработке. Обычно это придает работе дополнительную прелесть. Красный свинец также обеспечивает антикоррозийную обработку.

Чтобы предотвратить дальнейшее окисление металлической поверхности, очень важно нанести подходящую грунтовку сразу после подготовки и очистки лакокрасочной поверхности. Процесс грунтовки увеличивает адгезию покрытия к поверхности стали.

Большинство грунтовок, используемых на стали — это свинцовый краситель, красный оксид или хромат цинка. Загрунтованная сталь не ржавеет легко и увеличивает срок службы материала. Для таких металлов, как алюминий и оцинкованное железо, рекомендуется использовать грунтовку для травления или хромат цинка.

Процесс нанесения металла электрическим способом называется гальванопокрытием.

Перед нанесением гальванического покрытия изделие сначала очищается, а затем тщательно полируется. Соответствующий раствор заливается в резервуар с целью нанесения его на металл.

Например, если мы хотим нанести омеднение на латунь, мы загрузим в резервуар медный купорос.

Точно так же для разных металлов используются растворы разных солей металлов. В этот резервуар опускаются две медные пластины, а затем в него опускается и латунная деталь. Рассматривая медные пластины в качестве анода, а латунные - в качестве катода, мы подключим их к источнику постоянного тока и подадим ток от 2 до 3 вольт.

При этом медь начнет плавиться с медных пластин и осаждаться на латунных пластинах. Толщина металлического слоя зависит от подачи тока и продолжительности погружения изделия в раствор.

После нанесения гальванического покрытия изделие промывают чистой водой и посыпают деревянной пылью. Этот процесс приносит сияние в работу. Для придания блеска полировка выполняется еще раз.

1.2 Виды антикоррозионных покрытий, используемые для защиты оборудования и трубопроводов в нефтегазовом комплексе

Современные методы защиты металлов против коррозии основаны на следующих методиках:

- повысить химический сопротивление конструкционным материалам;
- изолировать поверхность металла от воздействия агрессивных сред;
- снизить агрессивность производственных сред;
- снизить коррозию применением внешних токов;
- снизить коррозию применением внешних токов; снизить коррозию применением внешних токов.

Таким образом, в широких масштабах применяются различные методы, к которым относятся:

- легирование металлов;
- металлические покрытия, неметаллические покрытия, лакокрасочные покрытия;
- фосфатирование;
- катодная и анодная защита;
- изменение свойств коррозионной среды;
- органическое и неорганическое ингибирование;
- защита от коррозии блуждающими токами;
- рациональное конструирование.

Существует три разновидности фосфатирования металлами - железо, цинк и марганец - различия которых указывают на уникальные кристаллы,

образующиеся в каждой из них. Обычно считается, что фосфатирование марганцем обеспечивает большую коррозионную стойкость, в то время как фосфатирование железом более стабильно, чем фосфатирование цинком, при более высоких давлениях и температурах.

При фосфатировании железом повышается адгезия краски и ее ударопрочность, обеспечивая при этом защиту от окисления. Известно, что фосфатирование железа обладает наименьшей коррозионной стойкостью из всех процессов фосфатирования; хотя из-за своей низкой стоимости оно чаще используется для внутреннего оборудования и деталей, которые обычно не подвергаются высокому уровню износа и коррозии. Цвет его отложений варьируется от бледно-голубого для легких отложений до серого для тяжелых отложений.

Основное применение фосфатирования марганцем - в качестве грунтовки для смазочных материалов или красок, как и в случае со всеми процессами фосфатирования. Фосфатирование марганцем является наиболее абсорбирующим [34, 18].

На протяжении многих лет были предприняты значительные усилия по поиску подходящих ингибиторов коррозии органического происхождения в различных агрессивных средах. В кислых средах в качестве ингибиторов используются материалы на основе азота и их производные, серосодержащие соединения, альдегиды, тиальдегиды, ацетиленовые соединения и различные алкалоиды, например, папаверин, стрихнин, хинин и никотин. В нейтральных средах бензоат, нитрит, хромат и фосфат действуют как хорошие ингибиторы. Ингибиторы уменьшают или предотвращают реакцию металла со средой.

Роль ингибиторов заключается в формировании барьера из одного или нескольких молекулярных слоев против кислотного воздействия. Это защитное действие часто связано с химической и/или физической адсорбцией, включающей изменение заряда адсорбируемого вещества и перенос заряда из одной фазы в другую.

Эффективными ингибиторами коррозии считаются серосодержащие и/или азотсодержащие гетероциклические соединения с различными заместителями.

Производные тиофена и гидразина обладают особым сродством к ингибированию коррозии металлов в кислых растворах. Неорганические вещества, такие как фосфаты, хроматы, дихроматы, силикаты, бораты, вольфраматы, молибдаты и арсенаты, были признаны эффективными в качестве ингибиторов коррозии металлов.

Считается, что пиррол и его производные обладают хорошей защитой от коррозии в кислых средах. Эти ингибиторы также нашли полезное применение в составах грунтовок и антикоррозионных покрытий, но основным недостатком является их токсичность, и поэтому их применение затруднено.

Ингибиторы зеленой коррозии являются биоразлагаемыми и не содержат тяжелых металлов или других токсичных соединений.

Некоторые исследовательские группы сообщают об успешном использовании встречающихся в природе веществ для замедления коррозии металлов в кислой и щелочной среде [1].

Например, ингибирующее действие экстракта семян Хиллы на коррозию стали в растворе HCl определяли с помощью измерения потери массы, а также с использованием потенциостатического метода.

Механизм действия связывают с образованием нерастворимых комплексов в результате взаимодействия катионов железа на мягкой стали.

Так же определили ингибирующее действие органических соединений, а, именно, меда на четыре различных металла — алюминий, медь, железо и цинк, каждый из которых поляризован в двух разных растворах, то есть в хлориде натрия и сульфате натрия.

В экспериментальном подходе использовался метод потенциодинамической поляризации.

Наилучший ингибирующий эффект был получен при поляризации цинка как в растворах хлорида натрия с добавлением меда, так и в растворах сульфата натрия.

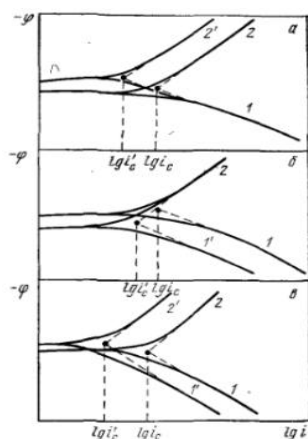
Экстракты розмарина показали некоторое катодное ингибирование, когда металл был поляризован в растворе хлорида натрия. Они применяются в различных сферах деятельности.

Возможность проявления защитных действий обусловлена их способностью влиять на процессы электрохимического происхождения, изменяя кинетику реакции [46].

Чтобы определить показатели эффективности действий ингибиторов, проводятся лабораторные тесты на специально подготовленные металлические изделия. Данные образцы помещаются в различные кислотные растворы, с ингибитором и без добавления, в соответствии с установленным температурным режимом в определенное время.

По итогам тестирования оцениваются защитные возможности ингибиторов [3].

Возможности торможения процесса коррозии представлены рисунке 1.



Ингибиторы (а — катодного, б — анодного, в — смешанного действия) влияющие на протекание процессов на электродах: 1', 1 — анодная кривая в присутствии ингибитора и без него; 2', 2, — катодная кривая в присутствии ингибитора и без него; i' , i_c — скорости саморастворения в присутствии ингибитора и без него соответственно.

Рисунок 1 – Пути торможения коррозионного процесса

Данные методы воздействия ингибиторов на общий процесс коррозии - один из важных этапов уменьшения коррозионной активности.

Присутствие ингибиторов в агрессивных условиях не только влияет на снижение скорости окисления металла, но и на снижение скорости окисления металла. А также на изменение электропотенциала, физических и химических характеристик поверхности.

Далее ингибиторные молекулы, уже адсорбированные, оказывают влияние на кинетику определенных электрохимических процессов.

Отсюда видно, что ингибиторное адсорбирование является первоначальным обязательным этапом процесса ингибиторов.

Совместная адсорбция ингибиторов и последующее влияние ингибиторов на электрохимические реакции рассматриваются как механизм ингибиторов.

Современные покрытия защиты обладают различными классификациями, такими как конечная применимость или характер поверхности, к которой будет наносить покрытие [12].

Покрытия для конечного использования могут включать:

- покрытия для транспортных средств и связанного с ними оборудования, такого как лодки, корабли, пирсы и другие объекты;
- покрытия для объектов, подверженных воздействию морской среды, такие как реакторы, барабаны, трубопроводы, здания и т. д., подвергающиеся воздействию суровых условий;
- покрытия для объектов, подверженных воздействию промышленных сред, это покрытия для трубопроводов, реакторов и т.д.;
- художественные покрытия, имеющие эстетические, стареющие, субстратные потребности.

Каждый из этих классов имеет различные требования.

Морские покрытия должны быть устойчивы к высокой влажности, присутствию хлоридов и погружению в воду, покрытия трубопроводов

должны быть устойчивы к сырой нефти, природному газу, воде и агрессивным водным растворам, растворителям; и т. д. [46]. В каждом конечном использовании будут свои особенности. Но все эти покрытия объединяет одно - жидкое покрытие, которое наносится на объект, который требует защитного покрытия.

Три основных ингредиента органической окраски - пигменты, связующие вещества, летучие носители. Пигмент является нерастворимым тонкоэмульсионным материалом, который обеспечивает цвет и износостойкость, коррозионную прочность и влагостойкость.

Связующее является полимерной нелетучей частью составной поверхности. Это важная составляющая пленки. Когда покрытия высыхают, они удерживают частицы краски или других добавок в отдельной, взвешенной форме, в толщину покрытия.

Связующие либо являются полимерными по своей природе, либо способны реагировать и образовывать термопластичную или термореактивную полимерную пленку в определенных условиях.

Они состоят из масел, эпоксидов, алкидов, полиэфиров, акрилов, винилов и т.п.

Летучая пленка растворяет или расщепляет связующее вещество, позволяя покрытию образовываться в виде тонких непрерывных пленок. Некоторые составы включены в систему в роли отвердителя.

В случае отверждения покрытий ультрафиолетом, отвердитель становится фотоинициатором, который вызывает быструю полимеризацию комбинаций мономерных и олигомерных частиц.

Готовый покрывной слой состоит из одного слоя пленки, а количество слоев и индивидуальная толщина зависят от конкретных конечных применений и особенностей.

Например, трехслойная система покрытий может быть изготовлена из грунтовок, нанесенных прямо на поверхность покрытия, цветной или декоративной поверхности, а также прозрачной верхней поверхности,

которая защищает цветные покрытия и придает глянец, а двухслойная система состоит грунтовки и цветного слоя.

Покрытие кузова автомобиля, которое не только является декоративным, но и функционально - защитным – обычно состоит из четырех слоев:

- электроосадочных грунтов;
- грунтовых покрытий;
- цветных покрытий;
- финишных лаков.

Порошковые покрытия часто используются в качестве однослойных покрытий.

Наиболее важным слоем в системе покрытий является грунтовка, так как она в первую очередь отвечает за защиту металла от коррозии.

Грунтовка должна обладать отличной смачиваемостью и адгезией к металлической поверхности и к следующему наносимому покрытию [9].

Компонентами грунтовки при использовании в качестве антикоррозийного покрытия являются различные ингибиторы коррозии, которые также известны как антикоррозионные пигменты. Грунтовочные покрытия иногда называют в честь этого пигмента, например, «насыщенный цинком грунт».

Система органического покрытия защищает металлические подложки от коррозии с помощью одного или нескольких механизмов:

- снижение скорости анодных (окисление) и/или катодных (восстановление) коррозионных полуреакций, происходящих на границе раздела металл/краска;
- введение высокого электрического сопротивления в цепь металлоэлектролитной коррозионной ячейки вызванного непроводящей органической пленкой, нанесенной на металлическую подложку.

Выступает в качестве эффективного физического барьера против переноса агрессивных частиц, таких как вода, которая является основой электролитных условий и кислород, который является окислителем, а так же различные ионы коррозии (Cl^- и т. д.) к металлической поверхности.

В целом, антикоррозионная эффективность органической грунтовки зависит от четырех факторов:

- природа металлической подложки, то есть ее подверженность окислительной коррозии;
- состояние границы раздела металл/грунтовка, например, ее электрическое сопротивление и емкость, природа ионов или молекул, присутствующих в этой области, и т. д.;
- состав грунтовочной пленки и эффективность антикоррозионных пигментов и любых других ингибиторов;
- коррозионная агрессивность окружающей среды и характеристик, которым подвергается металл с покрытием.

Средства защиты зависят от типа присутствующего расходуемого пигмента, связности пигмента и типа/пористости смолы, и это лишь некоторые факторы.

Эти покрытия не обязательно функционируют точно так же, как металлические покрытия, которые представляют собой тонкие слои металла/сплава, часто наносимые электро- или паровым осаждением на поверхность сплава, где весь слой является барьерным и/или расходуемым и не содержит связующей смолы.

Одни и те же расходуемые металлы могут использоваться в обоих типах покрытий, хотя конструкция грунтовки с высоким содержанием металлов дает определенные преимущества, такие как:

- способность задерживать активацию грунтовки через смолу или верхнее покрытие и снижать скорость собственной коррозии за счет изоляции части частиц;

- универсальная способность наносить распылением практически на любую свободную поверхность (хотя надлежащая адгезия может быть труднодостижимой).

Ключевым аспектом эффективности грунтовок с высоким содержанием металлов (MRP) является способность грунтовок защищать скрытые или рабочие дефекты, такие как царапины, а также подложку под неповрежденным покрытием.

Эффективный состав грунтовок с высоким содержанием металлов для достижения таких характеристик требует специальной настройки для каждой выбранной основы из сплава, и эта настройка осуществляется с помощью различных методов определения характеристик [17].

Благодаря целенаправленному дизайну MRP влияние этих покрытий может существенно улучшить долгосрочную целостность и живучесть компонентов.

На прибрежных газопроводах (стальных), например, было замечено, что неорганические грунтовки с высоким содержанием цинка сохраняют защиту от коррозии более 50 лет, было продемонстрировано, что на морских стальных платформах аналогичные грунтовки задерживают появление ржавчины на 10 и более лет.

Таким образом, грунтовки с высоким содержанием цинка стали особенно полезными для защиты стали.

Праймеры на основе цинка (ZnRP) функционируют в основном за счет гальванических взаимодействий с подложкой, обеспечивая временную защиту, и было продемонстрировано, что со временем накопление продуктов коррозии обеспечивает барьерную защиту вторичного импеданса и / или также химическую защиту [46].

Было продемонстрировано, что MRP на основе магния (MgRP) продолжают обеспечивать защиту подложки на алюминии после 4 лет воздействия атмосферы даже после того, как весь жертвенный металлический пигмент был преобразован в MgO посредством

комбинированного механизма гальванического и химического ингибирования [36]. Конкретные механизмы, посредством которых работают MgRP, до конца не изучены.

Результаты исследований демонстрируют синергетическое воздействие через несколько химических механизмов (например, буферизация pH на Mg^{2+} и диффузия к открытому субстрату).

Образование MgO, что было подтверждено испытаниями грунтовок, богатых MgO) гальванические механизмы (потенциал гальванической пары, достигаемый при регулировке объемной концентрации пигмента Mg (PVC), а также возможные эффекты вторичного импеданса покрытия и продуктов коррозии.

Конечно, MRP также могут вызывать, а не задерживать деградацию субстрата, если они не разработаны должным образом.

Взаимодействия между MRP, окружающей средой и макродефектами, обнажающими подложку, сложны, как и конкретные комбинации механизмов, с помощью которых эти покрытия работают в уникальных сценариях.

Например, ZnRP на одной высокопрочной броневой стали ускорили коррозию и водородное охрупчивание из-за достижения чрезмерно катодных потенциалов (сильно водородогенерирующих) [21], тогда как на трубопроводной стали аналогичные ZnRP подавляли коррозию на десятилетия [28].

Таким образом, хорошо информированная и целенаправленная разработка технологий MRP необходима для максимальной защиты от коррозии, последующей надежности и возможной экономии средств за счет использования MRP.

Это возможно благодаря тщательному тестированию MRP и оценке производительности в соответствующих условиях окружающей среды. Примеры антикоррозийных покрытий используемые на отечественном рынке представлены на таблице 1

Таблица 1 – Примеры антикоррозийных покрытий, доступных на отечественном рынке

Торговое наименование	Состав	Заявленные характеристики	Преимущества	Недостатки
Грунтовка цинковая по металлу Finlux F-296 Жидкий цинк 96%	Активный компонент – цинк (96% по массе).	Замедление коррозии Одновременная активная (катодная) и пассивная (барьерная) защита Срок службы – 50 лет Рабочий интервал температур - -60С - +150С	Не требует специальных подготовительных работ	Высокая стоимость
Антикоррозионная атмосферостойкая эмаль ОС-12-03	Органосиликатная композиция	Антикоррозионная защита поверхностей, эксплуатируемых в агрессивной промышленной среде и при повышенной влажности. Усиление морозостойкости и влагонепроницаемости. Срок эксплуатации – 5-15 лет Рабочий интервал температур - -60С - +300С	-	Необходима подготовка поверхности Рекомендуемое количество слоев – более 2х Срок службы при определенных условиях не более 5 лет.
Фосфотирующая пропитка «Фосфомет»	Водный раствор ортофосфорной кислоты, ингибиторов коррозии и специальных целевых добавок.	-	Не требует подготовки поверхности Цена	Нельзя обрабатывать ряд поверхностей (например цинк) Минимальное количество слоев – 2

2 Анализ коррозионного состояния оборудования и трубопроводов на исследуемом объекте в нефтегазовой отрасли

2.1 Методы неразрушающего контроля, используемые для определения коррозионного состояния оборудования и трубопроводов исследуемого объекта

Неразрушающий контроль (НК) – метод контроля, относящийся к осуществлению обнаружения дефектов материала, не требующий выведения объекта из работы либо его демонтажа.

Коррозия — это ухудшение свойств материалов из-за взаимодействия с окружающей средой и материалами, например, металлы и сплавы, неметаллы, древесину, керамику, пластмассы и композиты.

Предпочтительным металлом для работы по-прежнему является мягкая сталь с ее огромным количеством достоинств, например, относительно низкой стоимости, механической прочности и простоты изготовления. Тот факт, что сталь легко подвергается коррозии, является основным недостатком, а это означает, что она быстро теряет прочность, что легко приводит к разрушению конструкции. Поэтому на стальные или другие металлические конструкции, такие как сосуды, обычно наносят специальные защитные покрытия для профилактики против появления дефектов.

Целью покрытия является предотвращение коррозии путем создания барьера между окружающей средой и металлической поверхностью. Покрытие обеспечивает высокий уровень защиты от коррозии. Развитие незамеченной коррозии может привести к серьезному ущербу. Серьезные последствия включают риск для безопасности людей, ущерб окружающей среде и экономические последствия. Необнаруженная коррозия может развиваться под покрытием, что может привести к выходу из строя оборудования и магистральных трубопроводов. Один из наиболее частых явлений появления - нахождение стали в контакте с водой и кислородом. Для

повышения эффективности исследования были приняты различные методы НК для обнаружения коррозии под покрытием без его удаления, каждый из которых имеет разные возможности. Затем эти методы неразрушающего контроля используются для выявления проблемных областей, где требуется дальнейшая проверка.

Различные методы, такие как спектроскопия электрохимического импеданса [23], могут использоваться для определения состояния металла и определения уровня/тяжести любой коррозии. Проблемы неразрушающего контроля для обнаружения под покрытием разнообразны. Наряду с обычными проблемами точного обнаружения и количественной оценки коррозии эта задача усложняется из-за большого расстояния между датчиком и металлической поверхностью из-за недоступного слоя покрытия. Это расстояние известно как отрыв. Немедленным эффектом большого отрыва является снижение чувствительности к небольшим изменениям, сопровождающим коррозию, таким как изменение толщины или потеря массы. Между тем, толщина покрытий может быть разной, что приводит к различиям в отрыве. Проблемы, связанные с характеристикой коррозии металлов, требуют понимания микроструктурных и физических изменений, происходящих до возникновения и развития коррозии. В большинстве случаев коррозии на ранних стадиях преобладают изменения внутренних свойств материала. Физические повреждения, такие как дефекты, будут заметны, когда накопление этих изменений превысит критический предел.

Следовательно, не существует универсального метода обнаружения коррозии под покрытием, поскольку на поведение коррозии влияет сочетание разнообразных факторов.

Для обнаружения коррозии на металлической поверхности под покрытием неразрушающий контроль является мощным инструментом.

Современные методы неразрушающего контроля.

Для обнаружения коррозии применялось несколько методов неразрушающего контроля, каждый из которых имеет определенные

преимущества и недостатки. Например, для коррозионного контроля использовались вихретоковые методы, при которых используется относительно небольшой зонд и не требуется физического контакта с образцом. Однако эти методы можно использовать только для обнаружения коррозии на поверхности или вблизи поверхности. Кроме того, они чувствительны не только к изменениям проводимости и магнитной проницаемости образца, но и к вариациям отрыва.

Ультразвуковой контроль (УЗК). Ультразвуковой контроль основан на генерации и обнаружении механических волн или вибраций в тестируемых образцах. Кроме того, изменения свойств материала будут сильно отражать ультразвуковые волны на границах. Так, ультразвуковые методы часто используются для измерения толщины и контроля коррозии [25].

Хотя УЗ позволяет обнаруживать коррозию, этим методам трудно различить отражения от поверхностной/приповерхностной коррозии и отражения от поверхностей нескольких материалов.

Другим недостатком является то, что они требуют связующей среды, такой как вода или гель, для акустической передачи импульсов от преобразователя к материалу.

Это делает традиционное УЗК непригодным для определенных ситуаций из-за требований к подготовке поверхности.

В последние годы была проделана большая работа по разработке бесконтактных ультразвуковых методов определения характеристик дефектов, не требующих подготовки поверхности.

Методы воздушной связи включают адаптации традиционных пьезоэлектрических преобразователей [30], которые больше подходят для большинства условий контроля.

Однако, строгим требованием является соответствующий угол для введения ультразвука в проверяемые образцы. Как показано на рисунке 2, сообщается об экспериментальной установке для измерения коррозии с помощью направленных акустических волн в трубе.

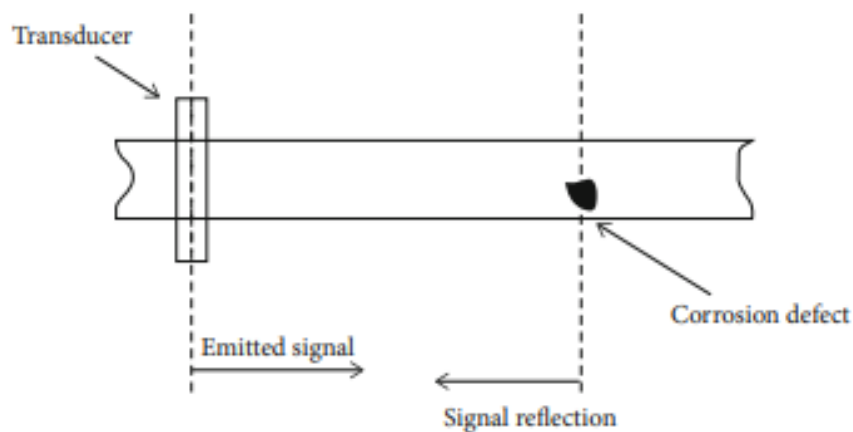


Рисунок 2 – Ультразвуковой контроль для обнаружения коррозии

Направленные акустические волны излучаются кольцевым преобразователем, проходящим через трубу. Когда коррозия встречается с волнами на стенках трубы, они отражаются и возвращаются к преобразователю.

Также были разработаны электромагнитные акустические преобразователи (ЭМАП), в которых электромагнитные бесконтактные преобразователи используются для генерации и приема акустических сигналов, хотя это означает, что ЭМАП ограничены электропроводящими материалами.

Также можно подавить высокочастотный узкополосный шум в сигналах ЭМАП.

В настоящее время разработки в области ультразвуковых методов привели к появлению портативных ультразвуковых инструментов с фазированной решеткой.

Точная настройка ультразвуковых волн осуществляется в образце за счет поэтапного возбуждения ультразвуковых решеток в одном преобразователе.

То и Данг [41] использовали ультразвуковой датчик с фазированной решеткой для обнаружения и определения размера трещин коррозии под напряжением в топливном баке.

В этом методе используется датчик с одной фазированной решеткой с законами фокусировки для двух видов секторного сканирования (S-сканирования) отдельно на основе скоростей поперечной и продольной волны.

S-сканирование поперечной волны методом поперечной волны с наклонным лучом используется для обнаружения трещин коррозии под напряжением.

S-сканирование продольной волны использует многолучевой метод для определения размера трещин коррозии под напряжением.

Лазерный ультразвук. Учитывая недавние достижения в лазерной ультразвуковой технике, лазеры можно использовать для генерации и обнаружения ультразвуковых волн.

Этот бесконтактный метод использовался для измерения толщины материала, обнаружения дефектов и определения характеристик материалов.

Лазерная ультразвуковая система состоит из лазерного ультразвукового генератора и интерферометрического датчика.

Лю и др. [29] использовали ультразвуковой лазер для обнаружения и локализации внутренней коррозии в полых металлических компонентах.

Пьезоэлектрические преобразователи с частотой 125 МГц и широкополосный ультразвуковой лазер используются для генерации ультразвуковых волн, которые будут взаимодействовать с коррозией, а затем изменения в генерируемых волновых режимах исследуются с использованием методов частотно-временного анализа.

В лазерно- ультразвуковом методе, как показано на рисунке 3, лазерные лучи генерируются и обнаруживаются на передней стороне, где используется режим отражения.

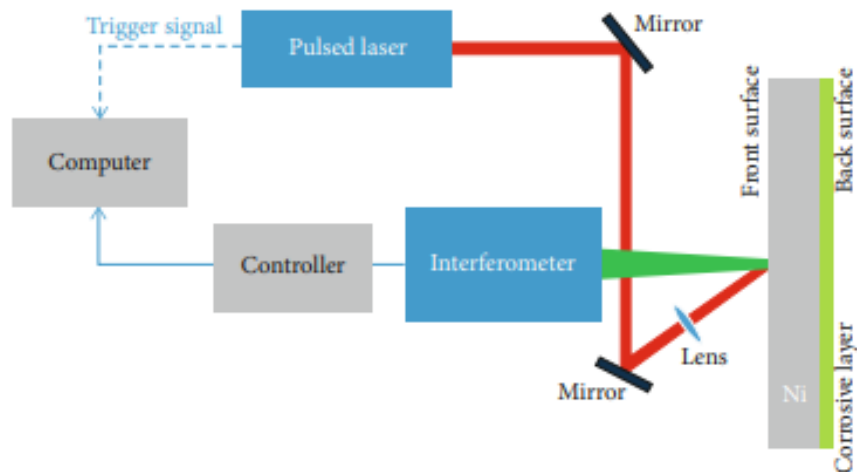


Рисунок 3 – Схема лазерно-ультразвукового обнаружения коррозии

Для генерации ультразвука используется импульсный лазер Nd:YAG. Лазерный ультразвуковой приемник (ТЕМРО) используется для обнаружения отраженного ультразвука. Детектор создает изменяющееся во времени аналоговое напряжение, пропорциональное мгновенному смещению на ультразвуковых частотах. Геометрические изображения коррозии могут быть получены путем сканирования образцов для идентификации коррозии. Ограничение этой методики состоит в том, что доступ к поверхности требуется испытываемый образец.

Кроме того, этот метод чувствителен к поверхностным дефектам, и поэтому его область применения ограничена.

Акустическая эмиссия (АЭ). АЭ определяется как энергия деформации, внезапно высвобождаемая внутри или на поверхности материала, которая генерирует переходную упругую волну. Поэтому динамический процесс, связанный с деградацией структуры, можно обнаружить с помощью АЭ.

Когда внешнее воздействие, такое как изменение давления, нагрузки или температуры, воздействует на конструкцию, высвобождаемая энергия заставляет локализованные источники формировать волны напряжения, и эти

волны затем распространяются на поверхность, где датчики используются для их регистрации.

В большинстве исследований методы АЭ использовались для обнаружения точечной коррозии. Чжан и др. [50] оценили форму волны акустической эмиссии для мониторинга коррозионного растрескивания под напряжением в нержавеющей стали 304. Сигналы АЭ собирались установленным широкополосным датчиком АЭ, а затем через предусилитель использовалось устройство сбора данных для захвата сигналов АЭ.

Ву и Байон [35] использовали метод АЭ для мониторинга развития точечной коррозии в аустенитных нержавеющей сталях. Они подтвердили, что АЭ можно применять в фундаментальных исследованиях точечной коррозии, поскольку он предлагает множество потенциальных преимуществ по сравнению с другими методами. Заки и др. [49] продемонстрировали эффективность АЭ при обнаружении коррозии бетонных конструкций на ранней стадии.

Метод АЭ можно использовать для обнаружения коррозии в режиме реального времени, что дает ему преимущество перед другими методами неразрушающего контроля. К сожалению, системы АЭ можно использовать только для качественного тестирования. Дополнительные методы неразрушающего контроля необходимы для получения количественных результатов в отношении размера и глубины коррозии. Кроме того, шум окружающей среды влияет на принимаемые сигналы АЭ. Таким образом, использование методов распознавания сигналов и шумоподавления имеет важное значение в реальных приложениях.

Вихревые течения (ВК). Вихретоковый метод является одним из наиболее эффективных методов обнаружения и характеристики поверхностных дефектов и коррозии в проводящих образцах.

Этот метод основан на удерживании рядом с образцом проводящей катушки с переменным током. Первичное магнитное поле создается в осевом направлении вокруг катушки. Затем электрический ток создает свое

собственное вторичное магнитное поле, которое всегда имеет противоположное направление и противостоит магнитному полю катушки в соответствии с законом Ленца, как показано на рисунке 4.

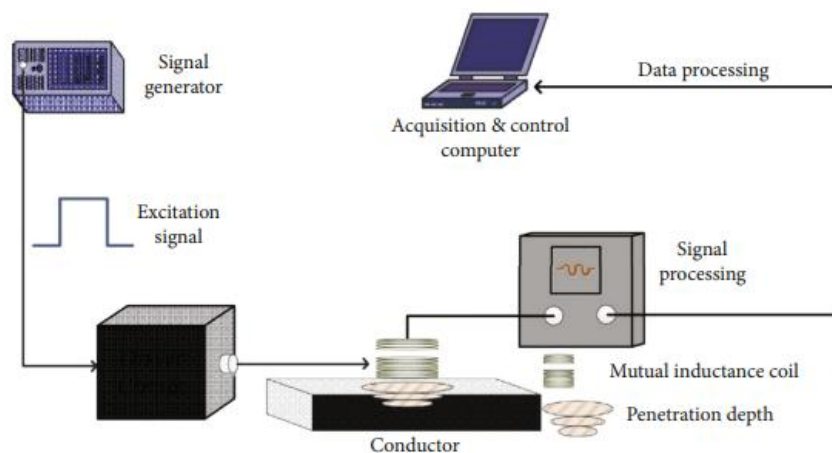


Рисунок 4 – Схема для обнаружения вихретоковой коррозии

Взаимодействие между магнитным полем, создаваемым катушкой, и магнитным полем, создаваемым вихревыми токами, затем исследуется с помощью датчиков или катушек. Методы ВК могут быть очень эффективными и были приняты для обнаружения наличия коррозии на поверхности металлических образцов.

Таким образом, методы ВК являются наиболее распространенными методами неразрушающего контроля, которые стали чрезвычайно портативными и относительно недорогими.

Рауд и др. использовали передовую технологию вихретоковой матрицы для контроля коррозионного растрескивания под напряжением. Однако традиционные методы ВК имеют трудности с обнаружением и количественной оценкой небольших потерь металла из-за коррозии в многослойных структурах. Это связано с тем, что способность методов ВК обнаруживать подповерхностные дефекты во многом определяется явлением скин-эффекта.

Большая часть тока протекает на поверхности проводника из-за скин-эффекта, который экспоненциально затухает с увеличением глубины.

Развитие технологии ВК привело к внедрению импульсных вихревых токов (ВЭТ). Это естественная эволюция метода ВК, разработанная для увеличения глубины проникновения.

В традиционных методах ВК синусоидальный ток фиксированной частоты используется для создания вихревых токов на поверхности проводника.

Гроссо и др. [20] представили результаты метода, основанного на многочастотном вихревом токе вместе с обработкой сигналов, для характеристики оксида железа в нефтехимическом резервуаре.

Толщина отдельных слоев соединения внахлестку была нанесена на карту с помощью этой техники. Результат показывает, что коррозию можно количественно определить с ошибкой менее 5% для различной толщины коррозии.

Кроме того, последние разработки в вихретоковой технологии привели к созданию многоканальных портативных приборов, которые позволяют быстрее проводить осмотр больших площадей.

Тем временем были разработаны новые магнитные датчики для замены катушек, такие как гигантские магниторезистивные датчики. Бейли и др. исследовали массив датчиков для характеристики коррозии труб под покрытием [48].

Рифаи и др. подробно рассмотрели и описали реализацию датчиков [51]. Однако методы на основе ВК ограничены электропроводящими материалами. Кроме того, эти методы очень чувствительны к эффектам отрыва, и поверхность материала должна быть доступна.

Утечка магнитного потока (MFL). MFL является производным от магнитопорошковой дефектоскопии (MPI). Он основан на измерении рассеяния магнитного потока, вызванного наличием коррозии. На практике намагничивание обеспечивается постоянным магнитом или электромагнитом

с постоянным, переменным или импульсным возбуждением. Разница между МРІ и MFL заключается в том, что последний измеряет утечку потока с помощью датчиков магнитного поля, таких как датчики Холла или магниторезистивные датчики. Система контроля в основном состоит из датчика магнитного сигнала, компьютера, сервера последовательного порта и устройства трехосевой передачи, как показано на рисунке 5 [27].

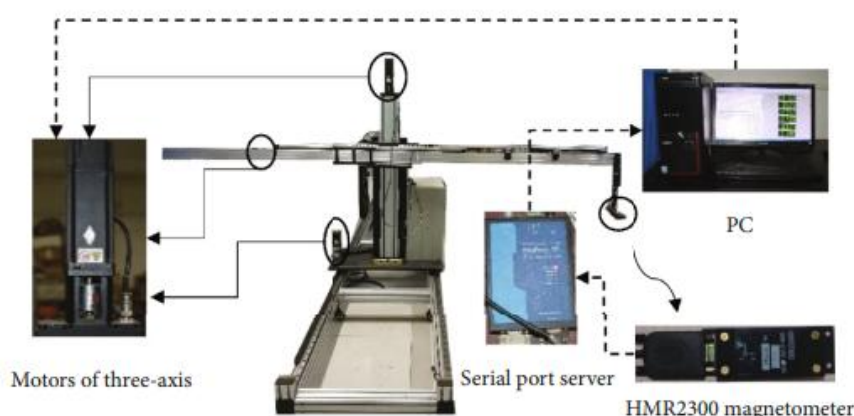


Рисунок 5 – Схема для контроля утечки магнитного потока

Ку и др. предложил спонтанный метод рассеяния магнитного потока для прогнозирования ширины коррозии кабелей. Трехкоординатное передающее устройство может обеспечивать три взаимно перпендикулярных пути сканирования, которые приводятся в движение тремя двигателями. Текущее положение магнитного датчика записывается.

Магнитный датчик Honeywell HMR2300 используется для сбора трехмерного сигнала рассеяния магнитного потока. Это гигантский датчик магнитосопротивления с диапазоном ± 2 гаусса. Разрешение составляет около 70 мкГс. Таким образом, полученные данные можно обрабатывать с помощью компьютерного анализа, обработки сигналов и количественной оценки. Однако MFL подходит только для характеристики коррозии

ферромагнитных материалов. Методы MFL популярны при осмотре трубопроводов.

Азизах и Сафизадех [13] использовали адаптивный фильтр и метод шумоподавления на основе вейвлета для проверки трубопровода.

Ся и др. [52] использовали рассеяние собственного магнитного потока высокого разрешения для создания магнитных полей для количественного измерения коррозии. С помощью трех моделей роста (логистическая модель, экспоненциальная модель и линейная модель) и модели магнитного диполя утечка и потеря массы также могут быть обнаружены с помощью SMFL.

Также может быть указано точное место коррозии. Эге и Курамик [42] использовали MFL с датчиками AMR KMZ51 для изучения переменной скорости для обнаружения коррозии в металлических трубопроводах. Как глубина проникновения, так и чувствительность обнаружения были улучшены благодаря большому количеству компонентов сигнала переменной скорости.

Микроволновой неразрушающий контроль (МНК). Диапазон частот микроволн составляет от 300 МГц до 300 ГГц.

В отличие от ультразвуковых сигналов, микроволновые сигналы могут легко проникать в материалы диэлектрического покрытия, не подвергаясь сильному затуханию, и тогда внутренние структуры материалов могут взаимодействовать с этими микроволновыми сигналами. Затем эти микроволновые сигналы будут полностью отражаться на поверхности металла.

Таким образом, эти сигналы дважды проходят участки коррозии и дефектов, что увеличивает возможность их обнаружения под покрытием.

При измерении переданных или отраженных микроволновых сигналов методы микроволнового неразрушающего контроля исследуют амплитуду или фазу при проверке образца.

Кроме того, на свойства отражения и пропускания влияет отрыв и частота операций во время проверки. Экспериментальная установка для микроволнового неразрушающего контроля изображен на рисунке 6 [47].

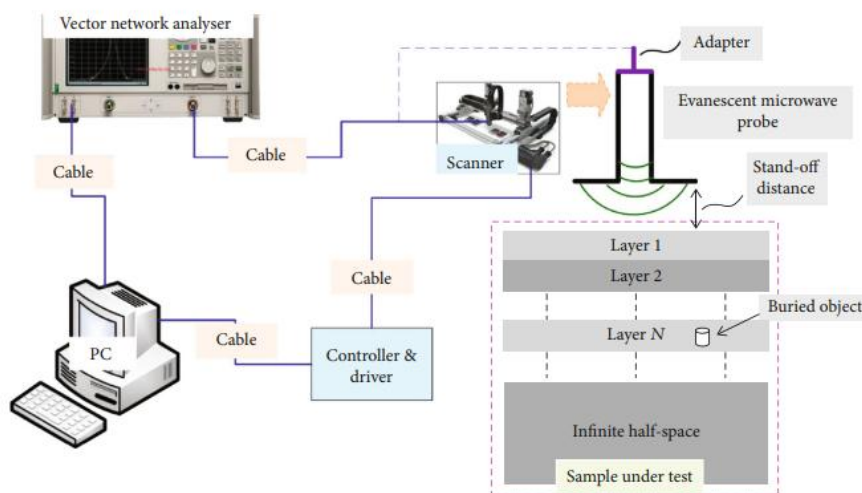


Рисунок 6 – Схема для микроволнового неразрушающего контроля

Волноводный зонд размещается над испытуемым образцом с заданным отрывом. Векторный анализатор цепей используется для подачи сигналов возбуждения и получения информации о частотном спектре отраженных сигналов. ПК используется для управления векторным анализатором цепей и сбора данных измерений, передаваемых на ПК через интерфейсную шину общего назначения. XY-сканер был подключен к контроллеру через параллельный порт и управлялся ПК. Программа MATLAB используется для совместной работы XY-сканера и векторного анализатора цепей во время измерения. Зонгай [51] использовал 3D микроволновую камеру для обнаружения коррозии стали на бетоне толщиной до 500 мм. Харьковский и Зуги [22] представили обзор методов неразрушающего контроля и электронной дефектоскопии на основе микроволнового и миллиметрового диапазона. Обсуждался широкий спектр применений, в том числе обнаружение коррозии и предшественников точечной коррозии в

изолированных конструкциях с алюминиевой и стальной подложкой. Адхварью и др. [15] продемонстрировали апертурную микроволновую патч-антенну на основе EBG с частотой 2,4 ГГц для определения характеристик коррозии стальной арматуры в строительных конструкциях, и хорошее разрешение было достигнуто на глубине около 14 мм. Подходы микроволнового неразрушающего контроля в дальней и ближней зоне обнаруживают коррозию по изменению величины и фазы коэффициента отражения.

С точки зрения высокого разрешения, интерпретации сигнала и нечувствительности к относительному положению между образцом и антенной, предпочтителен режим дальнего поля; но для достижения хорошего пространственного разрешения требуются антенны с большой апертурой. В большинстве ситуаций использование больших антенн вообще нецелесообразно и неудобно. Более того, режим ближнего поля можно использовать в помещении, что устраняет влияние погодных условий, электромагнитных помех и т. д. Методы микроволнового изображения ближнего поля с открытым концом прямоугольного волновода обычно используются для полей неразрушающего контроля.

Для получения изображения микроволновый радар с синтезированной апертурой сканирует тестируемый образец, а измеренные отраженные сигналы используются для формирования двумерного растрового изображения интенсивности. Мукерджи и др. [51] использовали датчик с резонатором с разъемным кольцом для композитного изображения с возможностью сверхвысокого разрешения. Разница между фазой и амплитудой отраженных сигналов использовалась для получения изображения с высоким разрешением для оценки размеров питов.

Каддуми и др. [37] продемонстрировал прямоугольный волноводный датчик с открытым концом, работающий в ближнем поле на частоте 24 ГГц для обнаружения и классификации дефектов в некерамических изоляторах. Дефекты были обнаружены и классифицированы с помощью новой

искусственной нейронной сети. Для обнаружения коррозии под покрытием использование микроволнового НК может быть расширено до обнаружения воды в слое покрытия, поскольку вода является причиной коррозии. Между тем, образцы с коррозией, связанной с покрытием, могут быть созданы, чтобы определить, можно ли различить пузыри, отслоения и другие дефекты покрытия с помощью микроволнового неразрушающего контроля.

Эти различные типы дефектов могут выглядеть одинаково при анализе особенностей микроволнового сигнала. Следовательно, необходимы новые функции, а также изучение того, как реакция покрытия на коррозию изменяется с течением времени, например, могут ли пузыри появляться как внезапные резкие изменения по сравнению с дефектами на металле. Для процесса микроволнового сканирования на больших площадях также можно использовать компрессионное зондирование, чтобы сократить время сканирования [37].

Будущая работа также будет включать изучение методов получения количественной информации об условиях под поверхностью стали, таких как изменения физических параметров. Это может быть достигнуто путем корреляции с использованием передовых методов выделения признаков [32]. Чжан и другие предложили микроволновую систему формирования изображений с разверткой в К-диапазоне с волноводной апертурой.

Терагерцовая (ТГц) технология. ТГц относится к электромагнитным волнам с частотами в диапазоне от 0,1 ТГц до 10 ТГц. Длины волн терагерцового излучения находятся между микроволновым и инфракрасным спектрами и составляют примерно от 0,03 мм до 3 мм. ТГц волна с известной длиной волны используется для освещения образца во время контроля. Эта терагерцовая волна исследуется на источнике излучения или рядом с ним после взаимодействия с тестируемым образцом.

Внутренняя структура образца определяется путем анализа изменений терагерцового сигнала, поскольку диэлектрические характеристики образца или несплошность будут влиять на терагерцовый сигнал.

На рисунке 7 показана типичная ТГц-система для обнаружения дефектов в слоях СОФИ (напыление на пенную изоляцию) для космического шаттла, и исследования показали, что ТГц-неразрушающий контроль может обеспечить эффективную оценку топливного бака шаттла под изоляционными материалами.

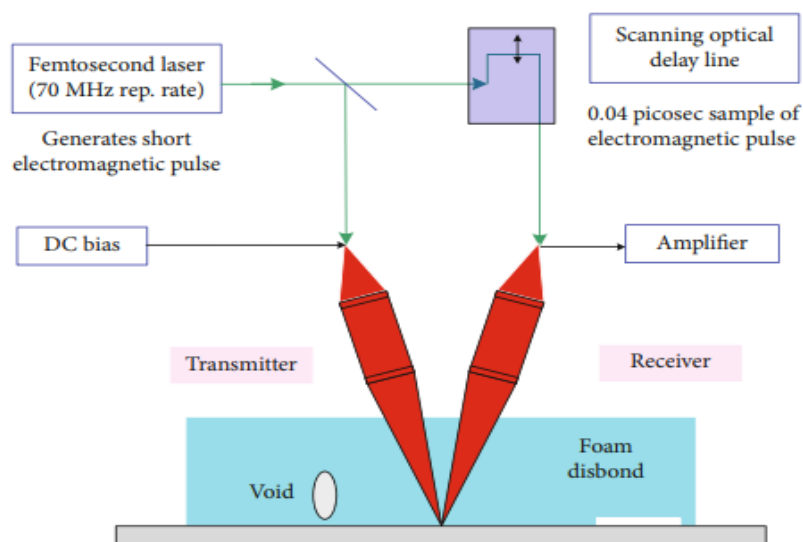


Рисунок 7 – Отраженная импульсная ТГц-система, используемая для обнаружении коррозии

С середины 1980 х годов методы, основанные на ТГц, значительно продвинулись вперед.

ТГц волны лучше проникают через большинство сухих неметаллических материалов, таких как пеноматериалы, керамика, стекло, смолы, покрытия, резина и композитные материалы [52].

Поэтому эти методы применялись в области неразрушающего контроля и электрохимии и могут быть разделены на непрерывные ТГц и импульсные ТГц методы.

ТГц неразрушающий контроль имеет уникальные преимущества в обнаружении внутренних дефектов в неметаллических материалах по сравнению с другими методами неразрушающего контроля.

Волна терагерцового диапазона может проникать через непрозрачные материалы и оценивать внутренние дефекты.

Кроме того, терагерцовый неразрушающий контроль использовался для контроля изолированных материалов.

Исследовательская лаборатория армии США и НАСА изучили способность терагерцовой визуализации коррозии под покрытием. Коррозия под покрытием приводит к тому, что номинально гладкие поверхности становятся шероховатыми и неровными.

Ту и др. продемонстрировал ТГц-систему для визуализации пилотируемых космических аппаратов, в которой высокоскоростная временная область используется для неразрушающей оценки [40].

Более того, во многих исследованиях было показано, что методы обработки сигналов могут быть адаптированы для терагерцового неразрушающего контроля.

Вы и др. применил метод двумерного непрерывного вейвлет-преобразования для извлечения информации о дефектах из ответов, который преодолевает ограничения традиционных непрямых методов, в которых используются сигналы отражения от металлической основы. для дальнейшего анализа [35].

Цао и др. приняли отраженные терагерцовые эхо-сигналы для определения четырех слоев покрытий на металлических подложках [33].

Однако терагерцовая волна не может проникать сквозь металлические материалы, что ограничивает область ее применения. Кроме того, методы на основе ТГц имеют недостатки высокой стоимости и сильного водопоглощения.

Термографические испытания. Термографические испытания измеряют тепловую дисперсию для охарактеризованного образца, который подвергается реакции на стимул. Улучшения в ИК-камерах привели к более совершенным формам термографии.

Преимущества термографии в том, что она работает в режиме реального времени и бесконтактно, а большая площадь может быть проверена за короткое время. В ИК-камере тепловое изображение создается невидимым для человеческого глаза инфракрасным светом, который излучается объектами из-за их теплового состояния.

Обнаружение инфракрасной термографии основано на различии температурных условий.

Существует два типа термографии: активная и пассивная. Активная термография (АТ) определяется как применение стимула для нагревания цели, что позволяет определить широкий диапазон ее характеристик.

Эти полученные характеристики могут быть дефектами или коррозией.

Пассивная термография (ПТ) определяется как измерение разницы температур между целевым материалом, окружающими материалами и температурными условиями окружающей среды.

Как правило, чаще всего используются методы, основанные на активной термографии. Сфарра и др. [38] использовали инфракрасную термографию для обнаружения сотовой структуры в сотовых структурах.

Майерхофер и др. [31] изучали использование инфракрасной термографии для исследования пустот и ячеистых пустот. Одним из недостатков метода является высокая стоимость качественных тепловизионных камер, но последние разработки привели к тому, что они стали значительно дешевле.

Радиографические методы. Рентгенография является одним из наиболее распространенных методов НК и основана на различии ослабления проникающего излучения в материалах в зависимости от энергии излучения, плотности и толщины материала.

Различные толщины и типы материалов дают разные коэффициенты затухания, а колебания интенсивности проходящего излучения вызваны коррозией.

Таким образом, доказана ценность рентгенограмм для обнаружения дефектов, коррозии и сварных швов в металлах.

Для исследования коррозии мягкой стали с покрытием, как показано на рисунке 8, используется рентгеновская трубка. использовался с генератором 160 кВ и $1,5 \text{ мм} \times 1,5 \text{ мм}$ фокусное пятно.

Напряжение и ток трубки установлены на 150 кВ и 10,7 мА.

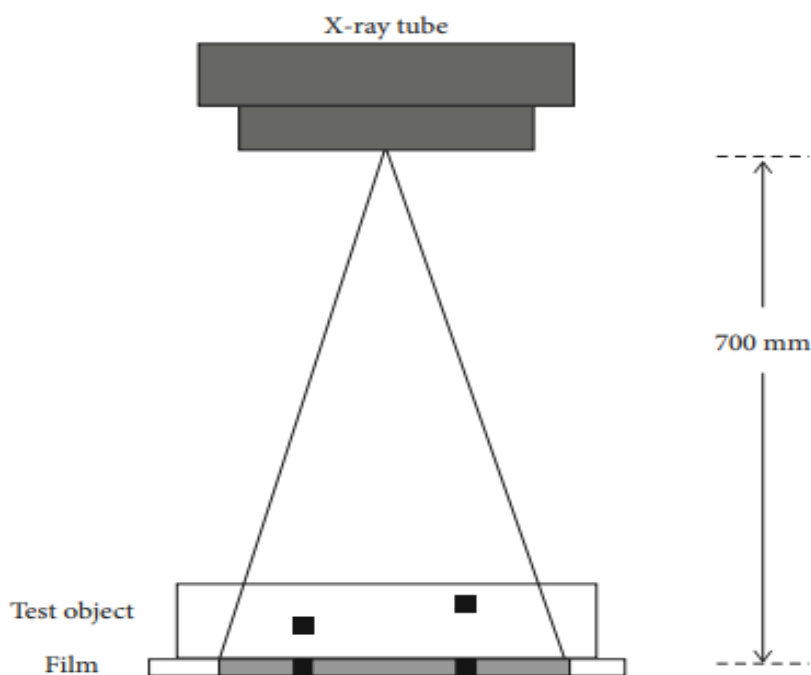


Рисунок 8 – Схема рентгенографической установки для обнаружения скрытой коррозии

Для картирования участков коррозии на образцах толщиной 11 мм время экспозиции установлено равным 190 сек Пленка AGFA D7.

Во время рентгенографического исследования используется метод одиночного изображения одной стенки для получения скрытой коррозии.

Пленка остается нетронутой вместе с испытуемым образцом.

Для минимизации искажений (из-за расходимости луча) и геометрической нерезкости расстояние между пленкой и источником рентгеновского излучения установлено равным 700 мм. Чувствительность

рентгенографического изображения 2% достигается при использовании соответствующего показателя качества изображения.

С помощью пленочного дигитайзера Model Array 2905 рентгенограммы оцифровываются с разрешением 50 микрон.

Существует несколько различных рентгенографических методов, включая профильную рентгенографию, цифровую рентгенографию, флэш-рентгенографию и рентгенографию в реальном времени. Эти методы основаны на использовании либо гамма-лучей, либо рентгеновских лучей для получения изображения профиля конструкции или для получения информации о толщине внутренней конструкции.

Во многих случаях несплошности в изолированных металлах легко обнаруживаются.

Рентгенография по-прежнему широко используется, несмотря на ее дороговизну и тот факт, что ионизирующее излучение представляет опасность для здоровья и безопасности.

Последние разработки в области цифровой рентгенографии помогли отказаться от использования пленки, что снизило затраты.

Станнанд и др. применили синхротронную рентгеновскую томографию для анализа коррозионно-усталостных трещин [39].

Барлоу и др. использовали рентгеновский микронзонд для определения характеристик коррозии на границе раздела полимер-сталь [16].

Однако, помимо вышеперечисленных проблем, существует несколько заметных ограничений на использование рентгенографии.

Например, он не подходит для обнаружения поверхностной коррозии, а также не позволяет получить количественную информацию для оценки глубины коррозии.

Вихретоковая импульсная термография (ЕСРТ).

ЕСРТ включает в себя применение высокочастотного электромагнитного волны (обычно 50–500 кГц) при высоком токе от 256 до

380 А к проверяемому материалу в течение короткого периода времени, обычно $20 \text{ мс}^{-1} \text{ с}$.

Наведенные вихревые токи вынуждены отклоняться, когда они сталкиваются с разрывом, что приводит к увеличению и уменьшению плотности вихревого тока в этой области. Области с повышенной плотностью вихревых токов демонстрируют более высокие уровни джоулевого (омического) нагрева, и, таким образом, коррозия, может быть, получена из последовательных термограмм во время периодов нагрева и охлаждения.

Он состоит из системы индукционного нагрева, которая индуцирует вихревые токи в исследуемом образце и выделяет тепло; вырабатываемое тепло регистрируется ИК-камерой для формирования цифровых данных; затем эти цифровые данные будут отображаться на мониторе и сохраняться на ПК.

На основе взаимодействий между распределением плотности вихревых токов и теплопроводностью можно рассматривать широкий спектр дефектов.

Области коррозионных пузырей легко обнаруживались с помощью последовательных термограмм с ИК-камеры во время экспериментального исследования.

Ян и др. использовали электромагнитную индукционную термографию для визуализации покрытия и оценки неразрушающей визуализации мягкой стали с покрытием.

Комплексное влияние изменения параметра на температуру было устранено с помощью фазового анализа, и теперь можно оценить высоту коррозии.

Микроволновая термография (МВТ).

Как показано на рисунке 9, основные принципы и типы МВТ были рассмотрены Жангом.

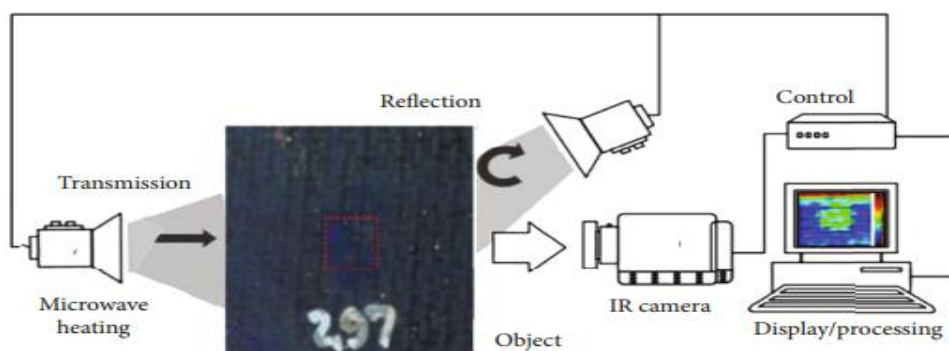


Рисунок 9 – Установка МВТ для обнаружения коррозии

MWT демонстрирует большой потенциал, включая быстрый нагрев, высокое разрешение, быструю проверку и высокую чувствительность, отсутствие требований к контакту и лучшую обнаруживаемость внутреннего дефекта. Фудаззи и другие предложили микроволновую термографию для обнаружения и характеристики корродированных армированных стальных стержней [44].

Они взяли для испытания $14 \times 24 \text{ см}^2$ рупорная антенна для освещения стальных стержней микроволновым сигналом мощностью 50 Вт в течение 10 с. Из-за относительно низкой теплопроводности корродированной стали тепло быстро рассеивается в некорродированной стали. Более того, эти температурные различия между корродированными участками указывали на то, что разная степень коррозии поглощает разное количество микроволновой энергии.

Предварительное моделирование и экспериментальное исследование микроволновой термографии для обнаружения коррозии в стальных стержнях показало, что более высокая микроволновая частота возбуждения приведет к более высокой температуре.

Пипер и другие продемонстрировали активную микроволновую термографию для контроля коррозии больших площадей арматурных стальных стержней для конструкций на основе цемента [26].

В ходе экспериментального исследования два стальных (AISI 1008) стержня (каждый длиной 150 мм и радиусом $4.170 \times 150 \times 50 \text{ мм}^3$). Один из них имел легкую коррозию на половине своей длины трубы, другой был значительно проржавел на протяжении порядка 1-4 мм его длины.

Образец нагревали в течение 5 секунд в микроволновой печи, работающей на частоте 2,45 ГГц. Кео и другие представили микроволновую термографию для обнаружения стали в железобетонной стене [26].

Во время экспериментального исследования коммерческий магнетрон, работающий на частоте 2,45 ГГц, был связан с пирамидальной рупорной антенной для освещения максимальной микроволновой энергией 800 Вт. Термограммы записывались со скоростью 1 изображение в секунду с использованием программного обеспечения ALTAIR на компьютере.

Эффекты коррозии представляют собой сложную комбинацию множества факторов, включая изменения проводимости, проницаемости и диэлектрической проницаемости, а также изменения толщины. Эти факторы влияют на вероятность обнаружения коррозии.

Не существует универсально применимого метода обнаружения коррозии из-за сложной комбинации этих различных факторов.

Таким образом, ни один из рассмотренных выше методов неразрушающего контроля не может решить все проблемы обнаружения коррозии под покрытием, поскольку слои покрытия вызывают большой отрыв между датчиками и контролируемой поверхностью.

Выбор метода неразрушающего контроля требует рассмотрения не только возможностей обнаружения.

Также важны качество оборудования, график осмотра, область осмотра, типы материалов, доступность, затраты и ожидаемые типы коррозии.

Некоторые методы дают хорошую количественную информацию, но плохо работают при нанесении покрытия.

2.2 Идентификация дефектов по результатам неразрушающего контроля на исследуемом объекте

Для использования неразрушающего контроля с целью идентификации дефектов и управления рисками при обслуживании нефтегазового трубопровода или других объектов нефтегазовой отрасли необходимо изначально определить вероятность наличия (или отсутствия) трещин или иных дефектов, которые могут привести к аварийной ситуации на контролируемом объекте. Данная вероятность наличия (или отсутствия) носит название вероятностью обнаружения (POD).

Существующие подходы к определению вероятности обнаружения представляют POD, как функцию единственного показателя повреждения, например, длины трещины.

В тех случаях, когда представляющие интерес коррозионные повреждения могут быть охарактеризованы с помощью одного показателя, будут уместны традиционные подходы POD.

Это может произойти при появлении малейших трещин, надломов, язв и т.д.

Для составления POD необходимо осуществить ряд проверок по следующему алгоритму:

- определить систему контроля в том числе методики, оборудования и персонала;
- анализ репрезентативной пробы с дефектами аналогичными ожидаемым на исследуемом объекте.

Так же важно понимание физических процессов, протекающих на поверхности исследуемого объекта и влияющие на появление прогнозируемого дефекта.

Проведение анализа реальных дефектов, обнаруженных на исследуемом объекте с целью определения причин, приведших к появлению данных дефектов.

Все это делается для построения адекватной модели POD.

На рисунке 10 представлен пример кривой POD.

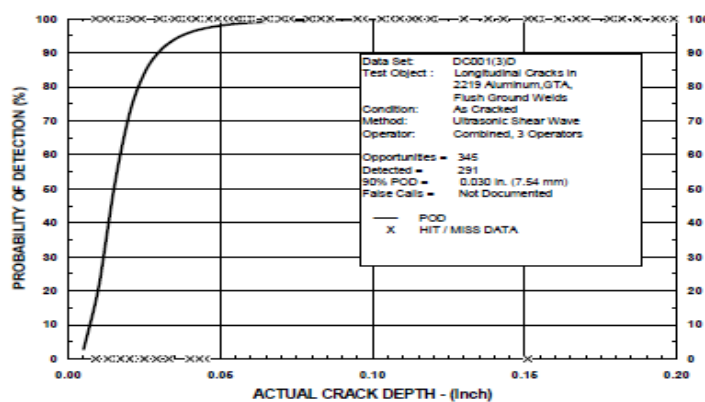


Рисунок 10 – Пример кривой POD, полученной при ультразвуковом контроле сварных швов

Таким образом, для своевременной идентификации дефектов посредством неразрушающегося контроля следует построить максимально точную модель POD.

Коррозия представляет серьезную угрозу для долгосрочного функционирования и целостности объектов нефтегазовой области. Основные параметры включают скорость. Конструкционная сталь подвержена коррозии, если ее оставить незащищенной или недостаточно защищенной от воздействия окружающей среды. Коррозия стальных перемычек может проявляться в виде общей равномерной потери толщины или концентрированного образования язв, в зависимости от воздействия окружающей среды и рассматриваемой детали конструкции из стали. Проектировщик должен рассматривать коррозию как долгосрочную угрозу целостности конструкции объектов - важнейшее конструктивное соображение, которое должно быть рационально учтено в процессе проектирования. Коррозия — это процесс, основанный на времени, и обычно требуется несколько лет, чтобы износ стал достаточно значительным, чтобы

вызывать беспокойство. По этой причине коррозия часто рассматривается как проблема владения или технического обслуживания.

Жидкий пенетрант является одним из наиболее широко используемых методов неразрушающего контроля для обнаружения дефектов поверхности стальных элементов. Основанное на принципе капиллярного действия поверхностное натяжение красителя позволяет ему проникать в неровности стали. Капиллярные силы очень сильны и могут действовать вопреки силе тяжести, что особенно полезно при проверке подвешенных стальных элементов. Тест на проникновение не требует специального оборудования и может быть выполнен быстро.

Преимущества метода проникновения жидкости заключаются в том, что его можно использовать практически для всех материалов, он прост и недорог при однократном контроле.

Недостатки очевидны: поскольку он проникает в дефекты под действием капилляров, метод чаще всего используется только для обнаружения дефектов, появляющихся на поверхности, таких как трещины и некачественные сварные швы.

Наряду с этим, проникновение жидкости в пористый материал невозможно, что затрудняет его применение на бетонных элементах. Процесс состоит из трех этапов, поэтому этот метод трудно автоматизировать, трудно проверять шероховатые поверхности; наконец, отсутствует информация о глубине дефектов.

Вихретоковый метод уже давно используется в нефтегазовой промышленности для обнаружения коррозии, трещин или других неоднородностей материала. Его применение было расширено и в области гражданского строительства. Вихретоковый метод включает в себя размещение зонда под напряжением вблизи поверхности стального образца. Вихревой ток имеет зависимость от проводимости образца. Если есть трещина или коррозия, произойдет перебой в подаче тока.

Вихретоковый метод позволяет проникать как через проводящие, так и непроводящие стальные покрытия, поэтому нет необходимости удалять краску во время осмотра. Иногда под краской обнаруживаются дефекты, такие как трещины и коррозия, которые трудно обнаружить при визуальном осмотре. В этом случае вихревой ток способен легко обнаружить его. Испытательное оборудование с использованием вихретокового метода может быть портативным и доступным по относительно низкой цене. Он также обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, быстрое тестирование, простота использования для автоматического обнаружения, отсутствие контакта с поверхностью и отсутствие необходимости в специальных навыках. С другой стороны, самым большим недостатком вихревого тока является то, что зонд должен находиться вблизи поверхности, а расстояние между зондом и поверхностью должно поддерживаться постоянным. При осмотре объектов нефтегазовой отрасли поверхность всегда шероховатая, и трудно постоянно поддерживать стабильную величину отрыва. Кроме того, результаты тестирования являются сравнительными, но не количественными, и являются эталонными.

Рентгенографическое тестирование обладает очень хорошей проникающей способностью. Испытанию могут подвергаться все материалы, включая металлы, неметаллы, композиты или смешанные материалы. Пленочная рентгенография обеспечивает постоянную запись результатов и совместима с компьютерными методами анализа.

К недостаткам рентгенографического метода относится то, что рентгенографический метод представляет опасность для здоровья из-за радиационного облучения. Это приводит к увеличению времени установки и осмотра ограждений для ограничения воздействия и обеспечения соблюдения надлежащих мер безопасности. При рентгеновском методе решающее значение имеют время экспозиции и размер фокального пятна. В гамма-методе требуются специальные механизмы для хранения и расширения источника. Как правило, оборудование тяжелое и громоздкое.

Для проведения тестов инспекторам необходима обширная практика. Из-за сложности оборудования этот метод не подходит для автоматизированного контроля.

В настоящее время разрабатываются некоторые другие передовые методы и технологии, такие как оптические датчики и лазерный сканер. Эти передовые методы дают представление о будущем неразрушающего контроля.

В последние годы использование оптических датчиков для контроля состояния стальных конструкций стало предметом интенсивных исследований для контроля коррозии, смещений, микротрещин, деформаций.

Распределенные датчики, основанные на рассеянии Бриллюэна, предоставляют уникальную возможность измерения профилей деформации и температуры вдоль оптических волокон.

Измерение выполняется путем установления корреляции между деформацией волокна и температурой, а также сдвигом частоты обратно рассеянного света по Бриллюэну, вызванного монохроматическим световым импульсом.

3 Разработка мероприятий по снижению воздействия коррозии на оборудование и трубопроводы в нефтегазовой отрасли на исследуемом объекте

3.1 Выбор высокоэффективных покрытий для защиты оборудования и трубопроводов от коррозии в нефтегазовой отрасли

«Срок службы материала и оборудования будет увеличен, если на материал наносится покрытие или создается барьерный слой для предотвращения контакта со средой или условиями окружающей среды.

Покрытие или барьерный слой может представлять собой материал, окрашенный или имеющий покрытие, или материал, обработанный металлической облицовкой.

Некоторые из неметаллических футеровок представляют собой стекловолокно, стеклянные чешуйки и эпоксидную смолу, которые обычно используются в оборудовании, таком как сепараторы, выбивные барабаны и резервуары для хранения.

Никель, цинк и кадмий покрывают некоторые компоненты, а именно фланцы и болтовые соединения [2]. Понятно, что такие устройства не являются постоянной обработкой и могут лишь в некоторой степени продлить срок службы основных материалов под барьером.»

На первом этапе работы необходимо было определить ряд покрытий из многообразия существующей номенклатуры.

Первичными критериями выбора покрытий являлись:

- доступность на рынке РФ. Приоритет отдавался покрытиям отечественного производства;
 - соответствие заявленных характеристик условиям применения.
- Рассматривались только покрытия, подходящие для использования в нефтегазовой отрасли для защиты трубопроводов;

- возможность использования. Рассматривались только покрытия, которые могут быть использованы для защиты трубопроводов на действующем предприятии.

Во внимание брались данные, указанные в инструкции по применению.

Не рассматривались покрытия, требующие перед своим применением подготовку, не осуществимую в условиях действующего производства. Предварительный выбор покрытий, удовлетворяющий всем первичным критериям представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Предварительный выбор покрытий

Торговое наименование	Группа	Состав	Стоимость	Заявленные характеристики	Преимущества	Недостатки
Finlux F-296	Грунтовка цинковая по металлу	Активный компонент – цинк (96% по массе).	770 руб/кг	Замедление коррозии Одновременная активная (катодная) и пассивная (барьерная) защита Срок службы – 50 лет Рабочий интервал температур - -60С - +150С	Не требуют специальных подготовительных работ	Высокая стоимость
ОС-12-03	Антикоррозионная атмосферостойкая эмаль	Органосиликатная композиция	568 руб/кг	Антикоррозионная защита поверхностей, эксплуатируемых в агрессивной промышленной среде и при повышенной влажности. Усиление морозостойкости и влагонепроницаемости. Срок эксплуатации – 5-15 лет Рабочий интервал температур - -60С - +300С	-	Необходима подготовка поверхности Рекомендуемое количество слоев – более 2х Срок службы при определенных условиях не более 5 лет.

Продолжение таблицы 2

Торговое наименование	Группа	Состав	Стоимость	Заявленные характеристики	Преимущества	Недостатки
Фосфомет	Фосфотирующая пропитка	Водный раствор ортофосфорной кислоты, ингибиторов коррозии и специальных целевых добавок.	78 руб/кг	-	Не требует подготовок и поверхности Цена	Нельзя обрабатывать ряд поверхностей (например цинк) Минимальное количество слоев – 2
Титана диоксид	Добавка	Титана диоксид 98%	998 руб/кг	-	-	-
Танины	Добавка	Танин 95%	2610 руб/кг	-	-	-

Чтобы решить вопрос выбора высокоэффективных защитных покрытий, появляется необходимость разработки объективной и точной экспериментальной методики, позволяющую оценить эффективность антикоррозионных покрытий в лаборатории и в производстве.

Самое главное для понимания и написания правильного вывода о защитных свойствах покрытий - правильное оценивание состояния окрасочного металла при испытании.

Этот аспект развития техники противокоррозии постоянно обращается к исследователям.

В связи с тем, что первоочередной задачей работы было определить высокоэффективное защитное покрытие, необходимо провести исследования, оценивающие эффективность определенного ранее ряда защитных покрытий.

Был составлен ряд экспериментов, позволяющих смоделировать в лабораторных условиях воздействие агрессивных сред.

Оценку эффективности проводили по двум методам – визуальному (качественная оценка) и весовому (количественная оценка).

Реактивы: танин – производства SOFRALAB SAS (Франция), титана диоксид – производства Цзянсу Хонгян Фармасьютикал Ко., Лтд.; защитный состав Finlux F-296, защитный состав ОС-12-03 и фосфотирующая пропитка – производства Фосфомет.

Все пластины прошли специальную подготовку: зачищали наждачной бумагой до блеска, промывали и осушили. Пластины номер 1 оставили как контрольную; пластины номер 2, 3 и 4 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, соответственно.

Пластины номер 5, 6 и 7 покрывали защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили Танин в концентрации 10% от массы.

Пластины номер 8, 9 и 10 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили TiO_2 в концентрации 10% от массы. Пластины номер 11, 12 и 13 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили Танин и TiO_2 в концентрациях 10% от массы.

На пластины были нанесены в разных локациях капли растворов кислой, щелочной, нейтральной среды в виде различных минеральных соединений, а после были на пораженные участки налиты капли реактива красной кровяной соли.

Расход всех составов и техника нанесения была выполнена согласно рекомендациям, изложенным в инструкциях к применению.

Далее на поверхности пластины было видно синее окрашивание турнбулевый синий, где было зафиксировано появление на локациях синего окрашивания.

Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Качественная оценка антикоррозионных свойств различных составов в различных средах

Образец	Среда	pH	Время, с	Скорость коррозии условная, г/(м ² ч)
Стальная пластина (контрольный образец)	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	6	0,1667
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	16	0,0625
	Щелочная (1М NaOH)	12	14	0,0714
Стальная пластина + Finlux F-296	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	>180	<0,0055
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + OC-12-03	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	95	0,0105
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	163	0,0061
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	43	0,0233
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	61	0,0164
	Щелочная (1М NaOH)	12	49	0,0204
Стальная пластина + Finlux F-296 + Танин	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	>180	<0,0055
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + OC-12-03 + Танин	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	132	0,0076
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + Танин	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	79	0,0127
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	122	0,0082
	Щелочная (1М NaOH)	12	76	0,0132
Стальная пластина + Finlux F-296 + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	>180	<0,0055
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + OC-12-03 + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	104	0,0096

Продолжение таблицы 3

Образец	Среда	pH	Время, с	Скорость коррозии условная, г/(м ² ч)
Стальная пластина + ОС-12-03 + TiO ₂	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	62	0,0161
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	97	0,0103
	Щелочная (1М NaOH)	12	87	0,0115
Стальная пластина + Finlux F-296 + Танин + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	>180	<0,0055
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + ОС-12-03 + Танин + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	158	0,0063
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	>180	<0,0055
	Щелочная (1М NaOH)	12	>180	<0,0055
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + Танин + TiO ₂	Кислая (2М H ₂ SO ₄)	1,2	102	0,0098
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	174	0,0057
	Щелочная (1М NaOH)	12	96	0,0104

Как видно из таблицы 3, при сравнении готовых составов, наилучший результат показал состав Finlux F-296. При испытании данного состава, окрас не появился за установленное максимально время выдержки, ограниченное 180 секундами (обусловлено физикой процесса). Напротив, наихудший результат продемонстрировала Фосфотирующая пропитка. По результатам теста, замедление коррозии относительно контрольного образца составило: в кислой среде – в 7,2 раз, в нейтральной – в 3,8 раза, в щелочной – в 3,5 раза. При добавлении Танина и TiO₂ в Фосфотирующую пропитку замедление коррозии относительно контрольного образца составило: в кислой среде – в 17,0 раз, в нейтральной среде – в 10,8 раз, в щелочной среде – в 6,9 раз. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о перспективности

применения данного подхода для усовершенствования характеристик уже готовых покрытий.

Средами для проведения испытания служат растворы с разным значением pH.

Все пластины зачистили наждачной бумагой до блеска, промыли и осушили. Пластину номер 1 оставили как контрольную. Пластины номер 2, 3 и 4 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой соответственно. Расход составов и техника нанесения согласно рекомендациям, изложенным в инструкциях. Пластины 5, 6 и 7 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили Танин в концентрации 10% от массы. Расход составов и техника нанесения согласно рекомендациям, изложенным в инструкциях. Пластины 8, 9 и 10 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили TiO_2 в концентрации 10% от массы. Расход составов и техника нанесения согласно рекомендациям, изложенным в инструкциях. Пластины 11, 12 и 13 покрыли защитными составами Finlux F-296, ОС-12-03 и фосфотирующей пропиткой, в которые предварительно добавили Танин и TiO_2 в концентрациях 10% от массы. Расход составов и техника нанесения согласно рекомендациям, изложенным в инструкциях.

Подготовленные образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 50С и относительной влажности 30%. Взвешивали и записывали массу каждого образца. Проводили с ними аналогичные эксперименты, выдерживая двенадцать часов при комнатной температуре.

Обработка результатов испытаний

Скорость коррозии (измеряется в $г/(м^2 \cdot ч)$) рассчитывают по следующей формуле:

$$W_{\text{корр}} = \frac{\Delta m}{S * \tau} \quad (1)$$

где Δm – разность масс образца до испытания и после испытания, г; S – площадь стальной пластинки, m^2 ; τ – время проведения испытаний, ч.

Разность масс находится по формуле:

$$\Delta m = m - m' \quad (2)$$

где m – масса образца до испытаний, г; m' – масса образца после испытаний, г.

Площадь стальной пластинки находится по формуле:

$$S = 2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot a \cdot h + 2 \cdot b \cdot h \quad (3)$$

где a – длина пластинки, мм; b – ширина пластинки, мм; h – толщина пластинки, мм.

Все результаты испытаний занесены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний количественного определения антикоррозийных свойств

Образец	Среда	pH	Скорость коррозии, $г/(m^2 \cdot ч)$
Стальная пластина (контрольный образец)	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	6,7432
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	6,6169
	Щелочная (1M NaOH)	12	6,6268
Стальная пластина + Finlux F-296	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,0035
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0052
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0017
Стальная пластина + ОС-12-03	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	2,1195
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0069
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,2228
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	4,7158
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	3,7649
	Щелочная (1M NaOH)	12	4,6810
Стальная пластина + Finlux F-296 + Танин	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,0017
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0051
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0087
Стальная пластина + ОС-12-03 + Танин	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,8759
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0034
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0017
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + Танин	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	1,4375

Продолжение таблицы 4

Образец	Среда	pH	Скорость коррозии, г/(м ² ч)
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + Танин	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,4171
	Щелочная (1M NaOH)	12	1,4574
Стальная пластина + Finlux F-296 + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,0017
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0051
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0052
Стальная пластина + ОС-12-03 + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,6347
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0069
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0110
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	3,7606
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	2,0995
	Щелочная (1M NaOH)	12	2,9149
Стальная пластина + Finlux F-296 + Танин + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,0018
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0
	Щелочная (1M NaOH)	12	0
Стальная пластина + ОС-12-03 + Танин + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,3153
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,0069
Стальная пластина + фосфотирующая пропитка + Танин + TiO ₂	Кислая (2M H ₂ SO ₄)	1,2	0,5973
	Нейтральная (H ₂ O дист.)	5,8	0,0240
	Щелочная (1M NaOH)	12	0,9243

Результаты, представленные в таблице 4 коррелируют с ранее полученными результатами качественного исследования антикоррозийных свойств и максимально полно дополняют их.

Проведенные расчеты позволяют численно оценить эффективность как коммерчески доступных защитных покрытий, так и усовершенствованных. Общая оценка показывает перспективность использования усовершенствованных покрытий как альтернативу с более высокими защитными характеристиками.

3.2. Анализ и оценка эффективности предлагаемых мер по обеспечению техносферной безопасности

Срок работы трубопроводов, исключая аварийные ситуации, без антикоррозионного покрытия на объектах нефтегазового комплекса оценивается в 5-8 лет. Гарантированный срок эксплуатации трубопроводов с антикоррозионным покрытием оценивается в 15-20 лет.

Ниже представлен расчет экономической эффективности, который проведен в ценах 2022 года в таблицах 5 – 9.

Таблица 5 – Расчет экономической эффективности

Исходные данные	Ед. изм.	Базовая технология (стальная труба)
Протяженность трубопроводов	м	1000
Сечение трубопровода	мм	580
Стоимость кап. ремонта 1 м труб	руб.	8950
Срок эксплуатации трубопровода	лет	5
Ежегодные отчисления на реновацию	руб.	1 100 736

Таблица 6 - Экономический эффект внедрения труб с внутренним высокоэффективным антикоррозионным покрытием

Расчетные показатели	Ед. изм.	Базовая технология (стальная труба)	Новая технология (труба с Finlux F-296)
Объем внедрения	м	1000	1000
Годовые эксплуатационные издержки, в том числе: а) затраты на реновацию	руб.	1 871 186	874 699
б) затраты на ликвидацию порывов	руб.	1 200 736	874 699
	руб.	670 450	-
Упущенная денежная выручка в результате порывов	руб.	2 648 500	-
Общие затраты на содержание трубопроводов (п.2 + п.3)	руб.	4 519 686	874 699

Продолжение таблицы 6

Расчетные показатели	Ед. изм	Базовая технология (стальная труба)	Новая технология (труба с Finlux F-296)
Эффективность от вложений за год от внедрения труб с покрытием Finlux F-296	руб.		4 519 686– 874 699 = 3 644 987
Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами	лет		15 853 478/3 644 987 = 4,5
Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет (5 лет – стальная труба; 15 лет – труба с АКП)	руб.		3 644 987 · 10 = 36 449 870

Общие затраты на содержание трубопроводов рассчитывается как:

$$OЗ = ГЭП + УДВ \quad (4)$$

где OЗ – общие затраты на содержание трубопроводов, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; УДВ – упущенная денежная выручка в результате порывов, руб.

Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет рассчитывается как:

$$ЧП = ГЭП \cdot КЛ \quad (5)$$

где ЧП – чистая прибыль, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; КЛ – количество лет.

Годовой экономический эффект от внедрения труб с покрытием Finlux F-296 рассчитывается как:

$$ГЭФ = БТ - НТ \quad (6)$$

где ГЭФ – годовой экономический эффект, руб; БТ – базовая технология; НТ – новая технология.

Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами рассчитывается как:

$$СО = КЗ/ЭФ \quad (7)$$

где СО – срок окупаемости, лет; КЗ – капитальные затраты, руб; ЭФ – экономический эффект, руб.

Таблица 7 - С внутренним покрытием ОС-12-03

Расчетные показатели	Ед. изм	Базовая технология (стальная труба)	Новая технология (труба с ОС-12-03)
Объем внедрения	м	1000	1000
Годовые эксплуатационные издержки, в том числе: а) затраты на реновацию	руб.	1 871 186	934 699
б) затраты на ликвидацию порывов	руб.	1 200 736	934 699
	руб.	670 450	-
Упущенная денежная выручка в результате порывов	руб.	2 648 500	-
Общие затраты на содержание трубопроводов (п.2 + п.3)	руб.	4 519 686	934 699
Эффективность от вложений за год от внедрения труб с покрытием ОС-12-03	руб.	4 519 686 – 934 699 = 3 638 987	
Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами	лет	13 823 394/3 638 987= 4	
Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет(5 лет – стальная труба; 15 лет – труба с АКП)	руб.	3 638 987 x 10 = 36 389 870	

Общие затраты на содержание трубопроводов рассчитывается как:

$$OЗ = ГЭП + УДВ \quad (8)$$

где OЗ – общие затраты на содержание трубопроводов, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; УДВ – упущенная денежная выручка в результате порывов, руб.

Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет рассчитывается как:

$$ЧП = ГЭП \cdot КЛ \quad (9)$$

где ЧП – чистая прибыль, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; КЛ – количество лет.

Эффективность от вложений за год от внедрения труб с покрытием Finlux F-296 рассчитывается как:

$$ГЭФ = БТ - НТ \quad (10)$$

где ГЭФ – годовой экономический эффект, руб; БТ – базовая технология; НТ – новая технология.

Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами рассчитывается как:

$$CO = KЗ/ЭФ \quad (11)$$

где CO – срок окупаемости, лет; KЗ – капитальные затраты, руб; ЭФ – экономический эффект, руб.

Таблица 8 - с внутренним покрытием на основе Фосфотирующей пропитки «Фосфомет» с добавлением Титана диоксида и Танина

Расчетные показатели	Ед. изм	Базовая технология (стальная труба)	Новая технология (труба с пропиткой)
Объем внедрения	м	1000	1000
Годовые эксплуатационные издержки, в том числе: а) затраты на реновацию б) затраты на ликвидацию порывов	руб.	1 871 186	775 749
	руб.	1 200 736	775 749
	руб.	670 450	-
Упущенная денежная выручка в результате порывов	руб.	2 648 500	-
Общие затраты на содержание трубопроводов (п.2 + п.3)	руб.	4 519 686	775 749
Эффективность от вложений за год от внедрения труб с покрытием пропиткой	руб.	4 519 686 – 775 749 = 3 743 937	
Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами	лет	8 593 596/3 743 937= 2,5	
Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет(5 лет – стальная труба; 15 лет – труба с АКП)	руб.	3 743 937 x 10 = 37 439 370	

Общие затраты на содержание трубопроводов рассчитывается как:

$$OЗ = ГЭП + УДВ \quad (12)$$

где OЗ – общие затраты на содержание трубопроводов, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; УДВ – упущенная денежная выручка в результате порывов, руб.

Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет рассчитывается как:

$$ЧП = ГЭП \cdot КЛ \quad (13)$$

где ЧП – чистая прибыль, руб; ГЭП – годовые эксплуатационные издержки, руб; КЛ – количество лет.

Эффективность от вложений за год от внедрения труб с покрытием Finlux F-296 рассчитывается как:

$$\text{ГЭФ} = \text{БТ} - \text{НТ} \quad (14)$$

где ГЭФ – годовой экономический эффект, руб; ГЭП – базовая технология; НТ – новая технология.

Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами рассчитывается как:

$$\text{СО} = \text{КЗ}/\text{ЭФ} \quad (15)$$

где СО – срок окупаемости, лет; КЗ – капитальные затраты, руб; ЭФ – экономический эффект, руб.

Таблица 9 - Сводная таблица оценки экономической эффективности использования различных высокоэффективных антикоррозионных покрытий

Расчетные показатели	Ед. изм	Новая технология (труба с Finlux F-296)	Новая технология (труба с ОС-12-03)	Новая технология (труба с пропиткой)
Эффективность от вложений за год от внедрения труб с АКП покрытием	руб	3 644 987	3 638 987	3 743 937
Срок окупаемости труб с АКП по сравнению со стальными трубами	лет	4,5	4	2,5
Чистая прибыль от труб с АКП за 10 лет	руб	36 449 870	36 389 870	37 439 370

На основании полученных результатов анализа данных, полученных при расчетах эффективности можно сделать вывод, что антикоррозионные покрытия являются хорошими материалами для защиты объектов нефтегазовой отрасли, снизит затраты на реновацию и поможет избежать издержек при прорыве.

Так же результаты исследований продемонстрировали перспективность применения подхода комбинирования различных добавок для достижения синергетического эффекта как хорошая альтернатива коммерчески доступным составам.

Для каждого процесса можно построить в совокупности процедуру.

На рисунке 11 представлена построенная регламентируемая процедура мониторинга покрытий в нефтегазовой отрасли.

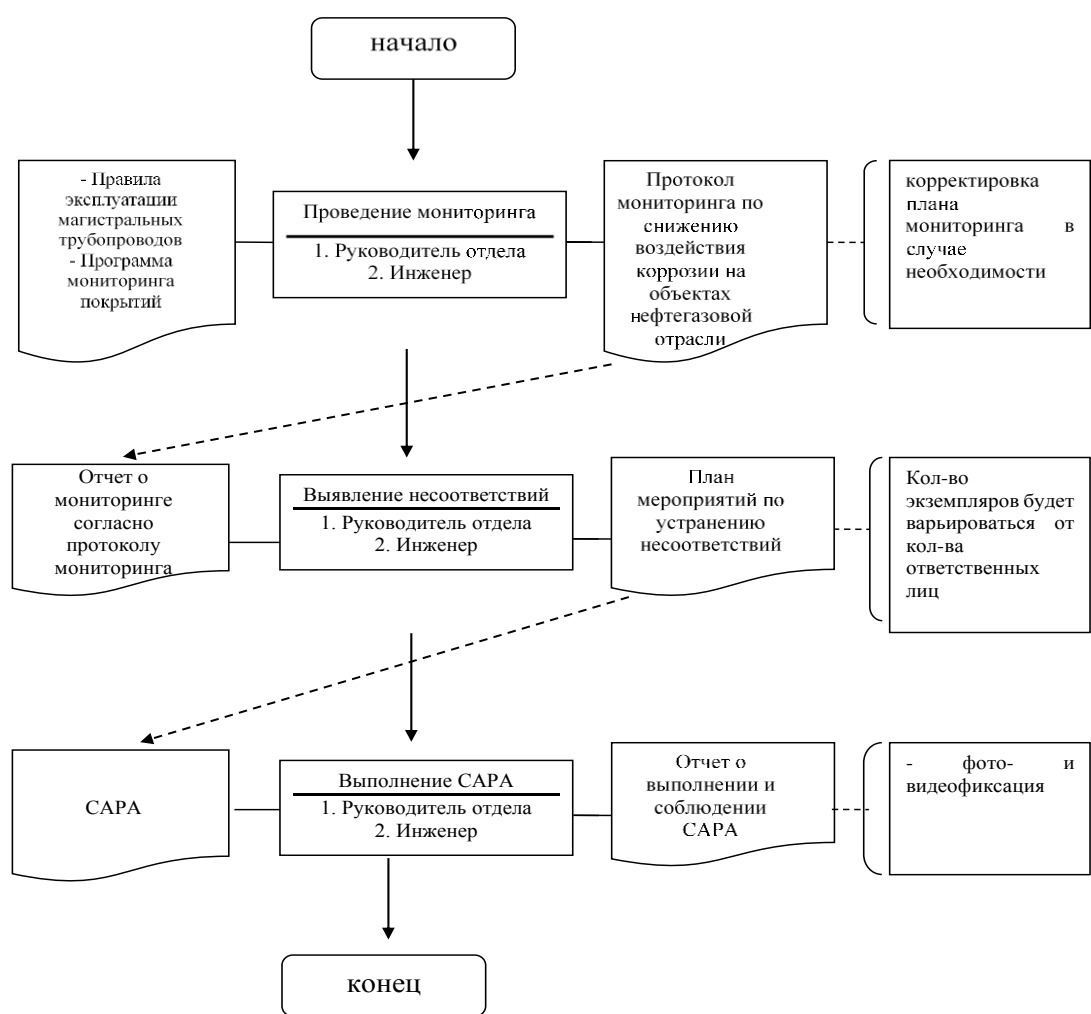


Рисунок 11 – Взаимосвязь входа и выхода регламентируемой процедуры мониторинга покрытий

Заключение

Проблема коррозии возникла с тех пор, как человек стал добывать металл и применять его.

Наши предки применяли свинцовые белила и гипс, чтобы защитить железные гвозди от ржавления.

И только десятки лет назад началось исследование и разработка материалов, составов, которые смогли защитить от коррозии.

Транспортировка опасной продукции приводит к риску возникновения аварийной ситуации, что приводит к значительным материальным и экономическим потерям.

Уменьшение риска возникновения аварийной ситуации на опасных промышленных объектах на определенном уровне человеческого развития, техники и технологий может быть обеспечено эффективным управлением промышленной безопасности, включающим, кроме того, периодические оценки уровня безопасности объектов опасных производств.

Без принятия мер безопасности и политики предотвращения коррозии коррозия создает трудности при транспортировке опасных материалов. Успешный план предотвращения коррозии, безусловно, не заканчивается практикой.

Он начинается с эффективного проектирования и монтажа трубопровода, применения методов борьбы с коррозией, а также технического обслуживания и наблюдения за линиями.

Необходимо четко понимать принцип коррозии, чтобы более эффективно выбирать материалы, а затем выбранный материал используется для проектирования, изготовления и использования металлических конструкций для обеспечения наилучшего экономического срока службы объектов и безопасности в нефтегазовой отрасли. во время операций.

Опыт инженера-коррозиониста и постоянный мониторинг, необходимые для предотвращения катастрофы, по-прежнему будут приносить пользу старым месторождениям.

В данной магистерской диссертации были рассмотрены современные высокоэффективные защитные покрытия, препятствующие образованию коррозии в нефтегазовой отрасли.

В первом разделе диссертации были изучены основные виды антикоррозийных покрытий, используемых для защиты объектов нефтегазового комплекса.

Проведено ознакомление с мировыми тенденциями в области защитных покрытий, рассмотрены патенты и научные публикации. Проведена классификация видов и механизмов возникновения коррозии, а также изучены основные методы борьбы.

Во втором разделе проанализированы методы неразрушающего контроля, используемые для определения коррозионного состояния оборудования и трубопроводов нефтегазовой отрасли, а так же идентификацию дефектов по результатам.

Приведены методы исследования и оценки. На основании данных особенностей, предложены способы улучшения данных составов.

В третьем разделе проведена разработка мероприятий по снижению воздействия коррозии на оборудование и трубопроводы в нефтегазовой отрасли. Качественное и количественное определение антикоррозийных свойств данных покрытий показало различную эффективность готовых составов и установило, что введение в состав Танина и TiO_2 позволяет значительно увеличить их эффективность. Определена практическая применимость усовершенствованных составов и подсчитана экономическая эффективность.

Список используемой литературы

1. Жаксыбаева А.Г. Ингибиторы коррозии для сохранения металлических изделий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12(1). С. 23-26.
2. Иванов Е. С. Ингибиторы коррозии металлов в кислых средах : учеб. пособие. Л. : Metallurgia, 1986. 175 с.
3. Коровкин Н.В. Общая химия : учебн. для студентов. Москва. : Высшая школа, 1998. 553 с.
4. Медведев М.С., Торопынин С.И. Преимущества нанесения преобразователей ржавчины без удаления продуктов коррозии перед нанесением преобразователей ржавчины с их удалением // Аграрная наука на рубеже веков: тез. докл. регион. науч. конф. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2004. С. 153-154.
5. Отто Ирина Петровна, Бубнова Яна Владимировна Экологическая безопасность Российской Федерации. Правовые аспекты // Образование и право. 2020. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-bezopasnost-rossiyskoj-federatsii-pravovye-aspekty> (дата обращения: 10.03.2022).
6. Ощепкова М.Ю., Шайдурова Г.И. Эффективные компоненты для преобразователей ржавчины // Лакокрасочные материалы и их применение, 2002. № 12. С. 9-10.
7. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 01.07.2021). URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 27.02.2023)
8. Романов О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. М. : Metallurgia, 1989. 176 с.

9. Руководящие указания по защите от коррозии механического оборудования и металлоконструкций гидротехнических сооружений. М. : Изд-во Центра НТИ по энергетике; Информ-энерго, 1976.

10. Семенова И.В., Флорианович, Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии / Под. Ред. И.В. Семеновой. М. : Физматлит, 2002. 336 с.

11. Хижняков В. И. Защита нефтепроводов от почвенной коррозии. // Приложение к журналу «Трубопроводный транспорт нефти». 2004. №12. С. 10 – 12.

12. Чепкасова О.А. Коррозия металлов [Электронный ресурс] / О.А. Чепкасова, А.А. Селезнева, А.И. Садилов // Молодой ученый. 2015 №23. С. 260-261. URL: <https://moluch.ru/archive/103/23845/> (дата обращения: 13.03.2023).

13. Adhvaryu M., Patel P. N., and Modhera C.D. «Apertured EBG-based microwave patch antenna for characterization of corrosion in steel rebar of civil structures» Sensing and Imaging, vol. 20, 2019. no. 1, 34 p.

14. Austin M. J. «Inorganic Anti-Corrosive Pigments» Paint and Coating Testing Manual, 14th ed., MNL 17, J. V. Koleske, ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995.

15. Azizzadeh T., Safizadeh M.S. «Design and manufacturing of the magnetic flux leakage inspection system for detection of pitting corrosion in gas pipelines», Iranian Journal of Manufacturing Engineering, vol. 5, no. 2, 2019. P. 43–49.

16. Bailey J, Long N, Hunze A. «Eddy current testing with giant magnetoresistance (GMR) sensors and a pipeencircling excitation for evaluation of corrosion under insulation» Sensors, vol. 17. no. 10. 2017. P. 2229.

17. Bierwagen et al., 2007; Yan et al., 2010; King and Scully, 2011; King et al., 2014a, 2015; Bastos et al., 2016; Santucci et al., 2017a, 2018a.

19. Cao B., Wang M., Li X., M. Fan, Tian G. «Noncontact thickness measurement of multilayer coatings on metallic substrate using pulsed terahertz technology» IEEE Sensors Journal, vol. 20. no. 6. 2020. P. 3162–3171.

18. «Coatings and Linings» ASM Handbook, Volume 13A, ASM International, Materials Park, OH, 2003.
20. Grosso M., Pacheco C. J., Arenas et al. «Eddy current and inspection of coatings for storage tanks». *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 7. no. 3. 2018. P. 356–360.
21. Feliu J. S., Morcillo M., and Feliu S. Deterioration of cathodic protection action of zinc-rich paint coatings in atmospheric exposure. *Corrosion* 57. 2001. P. 591–597. doi: 10.5006/1.3290386
22. Foudaz A., Ghas M. T., Donnl K. M. «Charcterization of corroded reinforced steel bars by activ microwav thermogrphy» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64. no. 9. 2015. P. 2583–2585.
23. Hattori M., Nishikata A., Tsuru T. «EIS study on degradation of polymer-coated steel under ultraviolet radiation» *Corrosion Science*, vol. 52. no. 6. 2010. P. 2080–2087.
24. He Y., Tian G., Zhang H., Alamin M., Simm A. «Stel corrosion characterization using pulsed current systems» *Sensors Journal, IEEE*, vol. 12. no. 6. 2012. P. 2113– 2120.
25. Honarvar and A. J. U. Varvani-Farahani. «A Review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation material characterizat and process control» *Ultrasonics*, vol. 108. 2020. P. 106227.
26. Keo S. A., Brachelet F, D. Defer, “Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography,” *NDT & E International*, vol. 62, pp. 172–177, 2014.
27. Kharkovsk S., Zough R. «Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation - overview and recent advances» *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 10. .no. 2. 2007. P. 26–38.
28. Leng A., Streckel H., and Stratmann M. The delamination of polymeric coatings from steel. Part 1: calibration of the Kelvin probe and basic delamination mechanism. *Corros. Sci.* 41. 1998. P. 547–578. doi: 10.1016/S0010-938X(98)00166-8

29. Li H., Zhng L., Liu et al H. F. «High-frequen ultrasoni method for determ corrosion layer thickn of hollow metallic components» *Ultrasonics*, vol. 89. 2018. P. 166–172.
30. Marcantoni V., Monarc D., Colanton A., Cecchin M. «Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: a review» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 120. 2019. P. 32–42.
31. Mukherje S., Shi X., Udpa L., Udpa S., Deng Y., Chahal P. «Design of a split-ring resonat sensor for nearfield microwav image» *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 17. 2018. P. 7066–7076.
32. Jone R. E, Simonett F., Low J. S., Bradle I. P. «Use of microwaves for the detect of water as a caus of corrosion under insulation» *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 31, no. 1. 2012. P. 65–76.
33. Maierhofer C., Arndt R., Röllig et al M. «Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures» *Cement and Concrete Composites*, vol. 28. no. 4. 2006. P. 393–401.
34. «Protection by Organic Coatings» *Proceedings of the Symposium on Corrosion Protection by Organic Coatings*, W. Kending, ed., The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ, 1987.
35. Wu K. and Byeon J-W. «Morphological estimation of pitting corrosion on vertically positioned 304 stainless steel using acoustic-emission duration parameter» *Corrosion Science*, vol. 148. 2019. P. 331–337.
36. Sinko J. Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatings. *Prog. Org. Coatings*. 42. 2001. P. 267–282. doi: 10.1016/S0300-9440(01)00202-8
37. Qaddoum N. N., El-Hag A. L., Sake Y. «Outdoor insulator test us artificial neural network-based near-field microwav techniqu» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63. no. 2. 2014. P. 260–266.
38. Sfarra S., Ibarra-Castanedo C., Avdelidis et al P. «A comparative investigation for the nondestructive testing of honeycomb structures by

holographic interferometry and infrared thermography» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 214. 2010.

39. Stannard T, Williams S. T., Singh S.S, Sundaram Singaravelu S. A., Xiao X., Chawla N. «3D time-resolved observation of corros and corros-fatigue crack initiat and grow in peak-aged Al 7075 using synchrot X-ray tomography» *Corrosion Science*, vol. 138. 2001. P. 340–352.

40. Tu W., Zhong S., Incecik A. «Defect featur extraction of marin protectiv coating by terahertz pulsed imaging» *Ocean Engineering*, vol. 155. 2018. P. 382–391.

41. To T. T., Dang T. N. «Research on measurem strateg of tank corrosion using phased technology» in *Applied Mechanics and Materials*, 2019. P. 499–507.

42. Y. Ege., Coram M. «A new measurem system use magnet flux leakag method in pipelin inspection» *Measurement*, vol. 123. 2018. P. 163–174.

43. Qu Y., Zhng H., Zha R., Lia L., Zho Y. «Resear on the method of predicti corrosion wid of cabl based on the spontan magnetic flux leakage» *Materials*, vol. 12. no. 13. 2019. P. 2154.

44. Rifa D., Abdall A., Ali K., Razal R. «Gant magnetoresistan sensors: a revi on structure and non-destructiv eddy current test application» *Sensors*, vol. 16. no. 3. 2016. P. 298.

45. Xia R., Zhou J., Zhang H., Liao L., Zhao R., Zhang Z. «Quantitat study on corrosion of ste strand based on self-magnet flux leakage» *Sensors*, vol. 18. no. 5. 2018. P. 1396.

46. Yan M., Gellin V. J., Hinderlit B. R., Batto D., Tallman D. E., and Bierwagen G. P.2010. SVET method fo characterizing anticorros performanc of metal-rich coatings. *Corros. Sci.* 52. P. 2636–2642. doi: 10.1016/j.corsci.2010.04.012

47. You C.-W., Lu C., Wang et al T.-W. «Method for contour extraction in terahertz non-destructive testing conduct with a rast-scan THz imaging » *Applied Optics*, vol. 57. no. 17. 2018. P. 4884–4889.

48. Zhang Z., Wu X., Tan J. «In-situ monitoring of corrosion cracking of 304 stainless steel in high-temperature water by acoustic emission waveform» *Corrosion Science*, vol. 146. 2019. P. 90–98.

49. Zhak A., Cha H., Aggeli D., Alver N. «Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: a review and capability of acoustic emission technique» *Sensors*, vol. 15. no. 8. 2015. P. 19069–19101.

50. Zhng Z., Xu L., Wu R., Simm A. «Sweep frequency microwave NDT for subsurface defect detection in GFRP» *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 60. no. 3. 2018. P. 123–129.

51. Zoughi R. *3D Microwave Camera for Concrete Delamination and Steel Corrosion Detection*, Missouri S & T, 2018.

52. Zhog S. «Progress in terahertz nondestructive testing: a review» *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14. no. 3. 2019. P. 273–281.