

На правах рукописи



Петрилин Дмитрий Андреевич

**АНТИКОРРОЗИОННОЕ ЛАКОКРАСОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ
РЕЗЕРВУАРОВ С СЕРНИСТОЙ НЕФТЬЮ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности)

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор
Реформатская Ирина Игоревна

Официальные оппоненты: **Хафизов Ильдар Фанилевич**
доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
кафедра «Пожарная и промышленная
безопасность», профессор

Корнев Владимир Васильевич
кандидат технических наук
Акционерное общество «ТВЭЛ»,
руководитель направления «Органический
синтез»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Защита диссертации состоится «18» февраля 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/888/yqw63a35ljm9xbeinorqfmqrv1yopxf/Диссертация%20Петрилина%20Д.А..pdf>

Автореферат разослан «18» декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Соковнин А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одна из основных задач нефтегазовой промышленности России – стабильная ежегодная добыча нефти на уровне 525 миллионов тонн с возможностью увеличения. Для хранения больших объемов нефти и нефтепродуктов используются резервуары различных конструкций, среди которых наиболее широкое распространение получили резервуары вертикальные стальные (РВС). В России насчитывается более 660 резервуарных парков с количеством резервуаров более 50 тысяч единиц.

Существенное влияние на техническое состояние нефтяного оборудования (до 30–50 % всех дефектов РВС) и режим его эксплуатации оказывает коррозия. Одной из причин возникновения пожаров нефтяных резервуаров является самовозгорание пирофорных коррозионных отложений, образующихся на внутренней поверхности резервуаров и представляющих собой продукты коррозии элементов их конструкции. Примерно половина всех пожаров, происходящих на объектах нефтегазовой отрасли промышленности (48 %), возникает на резервуарах для хранения жидких углеводородов.

Существует несколько методов противокоррозионной защиты нефтяных РВС, предотвращающих образование коррозионных, в том числе и пирофорных, отложений на их внутренней поверхности. Одним из часто используемых методов противокоррозионной защиты является нанесение изолирующих антикоррозионных лакокрасочных покрытий. Однако большинство выпускаемых и применяемых в настоящее время покрытий не выполняет требуемых защитных функций при использовании в РВС, предназначенных для хранения сернистой нефти и серосодержащих нефтепродуктов.

Нанесение лакокрасочных покрытий для защиты резервуаров с сернистой нефтью от коррозии оказывается малоэффективным вследствие несоответствия показателей защитной способности применяемых в настоящее время покрытий требованиям нормативной и технической документации. Для предотвращения образования пирофорных отложений и снижения пожаровзрывоопасности при эксплуатации РВС с сернистой нефтью необходима разработка и применение новых защитных покрытий, обладающих повышенной эффективностью в условиях высокой коррозионной активности сред, с которыми контактируют внутренние поверхности резервуаров.

Степень разработанности темы исследования. Изучению процесса коррозии резервуаров с сернистой нефтью, оценке последствий образования пирофорных коррозионных отложений на внутренней поверхности РВС и вопросу предотвращения их образования посвящены работы И.И. Реформатской и И.Р. Бегишева, С.А. Сырбу, В.П. Назарова, А.П. Петрова и др. Результаты работ некоторых исследователей в данной области использованы при разработке нормативной документации, регламентирующей проектирование, строительство и эксплуатацию РВС различного номинального объема.

Изучению механизма образования пиррофорных коррозионных отложений и методам защиты от них посвящены работы ряда зарубежных ученых (R.I. Hughes, P. Li, L. Smith и др.).

Однако в указанных работах отечественных и зарубежных исследователей вопрос антикоррозионной защиты нефтяных РВС посредством применения лакокрасочных покрытий практически не рассмотрен. В последнее время стали появляться исследования, рассматривающие новые подходы к проблеме защиты РВС с сернистой нефтью от коррозии с применением инновационных лакокрасочных полимерных материалов (работы В.А. Головина, З.А. Закировой).

Интерес к разработке новых многослойных лакокрасочных покрытий базируется на том, что большая часть покрытий, используемых в настоящее время для противокоррозионной защиты оборудования объектов нефтегазовой отрасли промышленности, является малоэффективной. В то же время применение многослойных покрытий на акриловой основе успешно реализовано при осуществлении антикоррозионной защиты оборудования в других отраслях промышленности.

Таким образом, **целью диссертационной работы** является разработка многослойного антикоррозионного лакокрасочного покрытия, обеспечивающего пожаровзрывобезопасность резервуаров при хранении сернистой нефти.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения работы были решены следующие **задачи исследования**:

– анализ условий образования пиррофорных коррозионных отложений на поверхности резервуаров с сернистой нефтью и статистики пожаров по причине самовозгорания пиррофоров;

– разработка методики определения эффективности защитного действия многослойных антикоррозионных лакокрасочных покрытий, выбор оптимальной композиции покрытия с учетом влияния состава каждого из его слоев на эффективность защитного действия всего покрытия;

– проведение испытаний по определению эффективности защитного действия разработанного лакокрасочного покрытия, выявление эмпирических зависимостей скорости образования пиррофорных коррозионных отложений на поверхности нефтяного резервуара от различных видов обработки поверхности;

– определение температуры воспламенения разработанного лакокрасочного покрытия, обоснование безопасного режима эксплуатации нефтяного оборудования при применении данного покрытия на объектах нефтегазовой отрасли промышленности.

Объектом исследования является процесс образования и самовозгорания пиррофорных коррозионных отложений на внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью.

Предмет исследования – антикоррозионное лакокрасочное покрытие, предназначенное для предотвращения образования на внутренней поверхности

резервуаров с сернистой нефтью коррозионных отложений, способных самовозгораться.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика определения эффективности защитного действия многослойных антикоррозионных лакокрасочных покрытий.

2. Получено антикоррозионное лакокрасочное покрытие для защиты резервуаров с сернистой нефтью от пожаров и взрывов по причине самовозгорания пиррофорных коррозионных отложений с учетом влияния состава каждого из его слоев на эффективность защитного действия всего покрытия.

3. Выявлены эмпирические зависимости скорости образования пиррофорных коррозионных отложений на внутренней поверхности нефтяного резервуара от различных видов обработки поверхности.

4. Определена температура воспламенения разработанного лакокрасочного покрытия, оценена безопасность его применения на объектах нефтегазовой отрасли промышленности.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что в ходе выполнения работы сформирован подход к повышению пожаровзрывобезопасности резервуаров с сернистой нефтью, заключающийся в нанесении на их внутреннюю поверхность многослойного лакокрасочного покрытия с учетом влияния состава каждого из его слоев на эффективность защитного действия всего покрытия. Разработан состав антикоррозионного лакокрасочного покрытия, снижающего скорость коррозии и предотвращающего образование пиррофорных отложений на внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использованы методы объектно-ориентированного анализа, физического эксперимента, наблюдения, сравнения, нахождения эмпирической зависимости на основе математической обработки экспериментальных данных, обобщения.

Информационная основа исследования – отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы, материалы разборов пожаров на резервуарных парках и объектах нефтегазовой отрасли промышленности, а также научно-исследовательских работ в области защиты РВС от коррозии.

Положения, выносимые на защиту:

– методика определения эффективности защитного действия антикоррозионных лакокрасочных покрытий;

– антикоррозионное лакокрасочное покрытие для защиты нефтяных резервуаров от пожаров и взрывов по причине самовозгорания пиррофорных коррозионных отложений;

– эмпирические зависимости скорости образования пиррофорных коррозионных отложений на внутренней поверхности резервуара с сернистой нефтью от различных видов обработки поверхности;

– температура воспламенения разработанного лакокрасочного покрытия, оценка безопасности применения данного покрытия на объектах нефтегазовой отрасли промышленности.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается: соблюдением условий моделирования при проведении лабораторного эксперимента; удовлетворительной сходимостью показателей защитной способности антикоррозионных лакокрасочных покрытий, полученных при нанесении на модельную поверхность в лабораторных условиях, с данными, полученными в результате проведения натуральных экспериментов; использованием поверенных измерительных приборов, апробированных методик измерения и обработки данных; внутренней непротиворечивостью результатов.

Практическая значимость исследования подтверждена использованием результатов при разработке рекомендаций по уменьшению скорости образования пирофорных отложений в резервуарах с сернистой нефтью и повышению пожарной безопасности резервуарного парка АО «Самаранефтегаз» и на научно-производственном предприятии «Криосервис». Результаты диссертации были использованы в ходе выполнения научно-исследовательской работы на тему: «Проведение научных исследований для получения исходных данных по использованию протекторов для противокоррозионной защиты внутренней поверхности кровли резервуаров с сернистой нефтью». Также результаты работы использованы при подготовке научно-педагогических кадров в Академии ГПС МЧС России.

Апробация работы. Результаты работы доложены на 10-ти международных и 7-ми всероссийских конференциях. Основными из них являются:

- XXIX Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2020» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2020 г.);
- X Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021 г.);
- V Международная научно-практическая конференция, посвященная Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021 г.);
- XXX Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021 г.);
- XI Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2022» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022 г.);
- XIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (г. Кокшетау, Казахстан, 2022 г.);

– XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2023» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023 г.);

– II Международная научно-практическая конференция «Обработка поверхности и защита от коррозии» (г. Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2023 г.);

– X Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 4 в журналах из Перечня ВАК России, и 3 в журналах, размещаемых в Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Содержание работы изложено на 131 странице машинописного текста, включает в себя 28 таблиц, 35 рисунков, список литературы из 132 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Обозначены методология и методы исследования, показаны научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о внедрении и апробации результатов работы.

В первой главе «Анализ статистики пожаров на нефтяных резервуарах и исследований в области их защиты от коррозии» на основе статистических данных проведен анализ пожаров на объектах нефтегазовой отрасли промышленности за 2018–2022 гг. Анализ показал, что большая часть пожаров происходит на резервуарных парках (48,25 %).

Рассмотрены примеры пожаров, произошедших на резервуарах с сернистой нефтью, причиной возникновения которых послужило самовозгорание пирофорных коррозионных отложений. Показана необходимость разработки более эффективных методов защиты, в том числе с использованием антикоррозионных лакокрасочных покрытий.

Проанализирована пожарная опасность пирофорных коррозионных отложений, образующихся на внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью. Показаны основные химические реакции, описывающие процесс коррозии и образования пирофорных отложений. Рассмотрены условия образования и последующего самовозгорания пирофорных отложений на поверхности оборудования (накопление отложений на поверхности оборудования до определенной толщины, их пористая структура). На резервуарах с сернистой нефтью взрывы и пожары в результате самовозгорания пирофорных коррозионных отложений происходят в те периоды времени, когда возникают условия интенсивного поступления воздуха внутрь емкости.

Приведены требования нормативно-правовых актов и нормативных документов к вертикальным стальным резервуарам, особенно в части, касающейся антикоррозионной защиты. Наиболее подробно положения антикоррозионной защиты изложены в документах, разрабатываемых предприятиями по добыче, хранению и транспортировке нефти. Данные документы устанавливают правила противокоррозионной защиты на территории объектов этих организаций.

Проанализированы лакокрасочные покрытия, используемые для защиты от коррозии резервуаров с сернистой нефтью. Чаще всего используются эпоксидные и полиуретановые (одно- и двухкомпонентные) покрытия. Одно из важных требований – применение покрытий со сроком службы не менее 10 лет.

Проведен обзор исследований механизма образования пиррофорных коррозионных отложений на поверхности резервуаров с сернистой нефтью, а также методов защиты от них. Ряд работ посвящен исследованию пиррофорных отложений. Экспериментально доказано, что пиррофорные коррозионные отложения в результате самовозгорания способны являться причиной пожаров резервуаров с сернистой нефтью.

Вопросу защиты РВС от коррозии и образования пиррофорных отложений посвящено наибольшее количество работ. Известно несколько методов антикоррозионной защиты нефтяного оборудования. Приведены результаты исследования метода антикоррозионной защиты с помощью создания внутри резервуара бескислородной газовой среды. Замена естественной газовой среды резервуара на азотно-кислородную смесь с содержанием $O_2 \leq 7\%$ (об.) позволяет добиться снижения скорости развития очагов локальной коррозии не менее, чем в 2,5–3 раза, но чаще на порядок и более величины. У данного метода есть как преимущества (возможность разделения воздуха при температуре окружающей среды и получения газообразного азота на месте эксплуатации), так и недостатки (большие материальные затраты на закупку и монтаж оборудования, сложность его эксплуатации).

Приведены результаты исследования других методов антикоррозионной защиты: замена естественной газовой фазы резервуаров на углекислый газ, обработка образовавшихся отложений различными химическими реагентами. Однако у данных методов в процессе эксплуатации нефтяного оборудования также были выявлены существенные недостатки.

Один из самых распространенных методов защиты от коррозии и образования пиррофорных отложений – обработка поверхности защитными составами. Большинство покрытий изготавливают на эпоксидной основе. Приведены результаты исследования защитной способности покрытий на эпоксидной основе. Выявлена недостаточная изученность метода защиты резервуаров с сернистой нефтью нанесением на их внутреннюю поверхность лакокрасочных покрытий на акриловой основе.

Во второй главе «Лабораторные исследования по определению эффективности защитного действия многослойных антикоррозионных покрытий» приведен процесс подготовки к коррозионным исследованиям

(разработка методики и лабораторного стенда), а также результаты проведения лабораторных испытаний по определению защитных свойств антикоррозионных покрытий.

На первом этапе был осуществлен выбор компонентов антикоррозионного покрытия (видов обработки). За основу разрабатываемого антикоррозионного лакокрасочного покрытия принята четырехслойная композиция. В качестве внутреннего слоя (наносится непосредственно на защищаемый металл) предлагается использование пассивирующей фосфатной пленки. Основная функция данного слоя – снижение скорости растворения металла при нарушении целостности внешнего слоя покрытия и попадании на него коррозионно-активной среды.

Для создания среднего (основного) слоя покрытия предлагается использовать уротропин ($C_6H_{12}N_4$, гексаметиленetetрамин). Данный слой будет поддерживать защитные свойства покрытия при нарушении сплошности внешних слоев.

В качестве третьего (грунтовочного) слоя предлагается использование раствора полиакрилата натрия в этиловом спирте (в соотношении 3 к 1). Функциональным назначением данного слоя будет обеспечение стабильного сцепления покрытия с металлом (адгезионные свойства покрытия).

В данной работе предложено использование в качестве внешнего слоя полиакрилата натрия $(C_3H_3NaO_2)_n$. Данное вещество является абсорбентом (способно поглощать количество воды, в несколько сотен раз превышающее массу вещества), оно известно как «водяной замок». Поэтому полиакрилат натрия при использовании в качестве внешнего слоя многокомпонентного покрытия будет предохранять нижележащие слои от контакта с водой.

Исследуемыми материалами в ходе проведения диссертационного исследования являлись образцы углеродистой стали марки Ст3. Указанная сталь широко распространена при строительстве и ремонте нефтяных резервуаров. Виды обработки поверхности и способы их осуществления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Виды обработки поверхности стали

| № п/п | Вид обработки | Химический состав | Способ нанесения | Кол-во слоев |
|-------|-------------------------|--|------------------|--------------|
| 1 | Фосфатирование | Раствор кислоты H_3PO_4 конц. 26,1 % (масс.) | окунание | 1 |
| 2 | Ингибирование | Раствор уротропина $C_6H_{12}N_4$ в этиловом спирте конц. 25 г/л | окунание | 1 |
| 3 | Грунтование | Полиакрилат натрия + этиловый спирт в соотношении 3:1 | кисть | 1 |
| 4 | Внешний (финишный) слой | Полиакрилат натрия | кисть | 1; 2 |

В работе приведен порядок подготовки поверхности образцов для проведения исследований. Внешний вид образца представлен на рисунке 1.

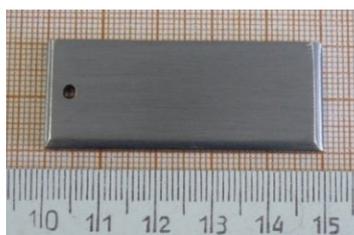


Рисунок 1 – Образец для коррозионных исследований

В лабораторных условиях образцы были испытаны в парогазовой среде, образующейся над раствором, представляющим модель конденсата влаги на внутренней поверхности кровли и стенок резервуаров с сернистой нефтью (рН 5,8; $[Cl^-]$ – $34,8 \cdot 10^3$ мг/л; $[S^{2-}]$ – 69,773 мг/л; $t = 40$ °С). В работе приведена процедура приготовления данного раствора.

Приведен алгоритм исследования поверхности образцов после лабораторных и натуральных коррозионных испытаний (очистка от продуктов коррозии, взвешивание на всех этапах испытаний, изучение поверхности). При помощи компьютеризированного оптического микроскопа марки НЕОРНОТ-32 (с возможностью 1000-кратного увеличения) было определено состояние поверхности, характер коррозионного поражения металла, размеры, максимальная глубина и плотность очагов локальной коррозии.

В работе приведен расчет параметров коррозионного процесса: массовой убыли Δm , скорости равномерной K_p , локальной $K_{л}$ и общей K_o коррозии (в мкг/(см²·ч) и мм/год). Суммарная (общая) скорость коррозии (K_o) рассчитана как сумма K_p и $K_{л}$:

$$K_o = K_p + K_{л} = \frac{\Delta m}{S \times \tau_{общ}} + \frac{h_{max}}{\tau_{общ}}$$

где: Δm – убыль массы образца после испытания, мкг; S – площадь поверхности образца, см² (26 см²); $\tau_{общ}$ – время пребывания образца в коррозионной среде, ч; h_{max} – максимальная глубина коррозионного поражения, мм.

Показатель h_{max} в данной работе определен методом оптической микроскопии. После исследования поверхности образца под микроскопом и выявления наиболее глубоких очагов коррозии (10 показаний) с помощью интервальной оценки (доверительного интервала) произведен анализ поврежденной поверхности образцов. В работе описан алгоритм расчета доверительного интервала при определении h_{max} для каждого образца.

Таким образом, в результате расчетов получено не конкретное значение максимальной глубины коррозионного поражения, а диапазон данных, имеющий нижнюю и верхнюю границы. Поэтому скорость локальной коррозии $K_{л}$ (мм/год) и скорость общей коррозии K_o (мм/год) для каждого образца были рассчитаны для нижней и верхней границ диапазона. По результатам расчетов были построены графики эмпирических зависимостей скорости коррозии от вида обработки поверхности стали марки Ст3.

Приведено описание оборудования для проведения исследований (лабораторный стенд). Для определения кислотности рабочих растворов использован рН-метр иономер марки «Экотест-2000». Для поддержания

требуемой температуры использован термостат марки Julabo. Исследование поверхности образцов произведено при помощи компьютеризированного оптического микроскопа НЕОРНОТ-32. Фотографирование образцов на различных этапах исследования произведено с помощью фотоаппарата Lumix.

Для проведения лабораторных коррозионных испытаний при температуре рабочей среды 40 °С использованы специальные термостатированные сосуды из стекла «пирекс» с герметично закрывающейся крышкой. Для имитации условий, реализующихся в РВС с сернистой нефтью, была сконструирована специальная система из термостата и трех последовательно соединенных термостатированных сосудов (рисунок 2).



Рисунок 2 – Стенд для лабораторных коррозионных исследований

Образцы были размещены в термостатируемых сосудах в парогазовом пространстве (газовая фаза). Для предотвращения контактной коррозии металла подвеска образцов была осуществлена таким образом, чтобы избежать их соприкосновения друг с другом на протяжении всего времени исследования.

Приведено описание лабораторных коррозионных испытаний. Было одновременно испытано по 2 образца с определенными вариантами антикоррозионной защиты. Всего подготовлено 14 образцов (7 различных видов обработки). Для исследования влияния частичного нарушения сплошности покрытия на скорость коррозии металла на некоторые образцы нанесена царапина (снята часть покрытия, поверхность металла не повреждена). Температура коррозионно-активной среды при лабораторных испытаниях составляла 20–40 °С, время испытаний 2000–4200 часов.

После извлечения поверхность образцов была исследована с помощью различных методов. По результатам гравиметрических коррозионных испытаний рассчитаны параметры коррозии: массовая убыль Δm , скорость равномерной K_p , локальной K_L и общей K_o коррозии (в $\text{мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ и $\text{мм}/\text{год}$).

На основании полученных данных для каждого условия испытаний (фаза, время) были построены эмпирические зависимости скорости равномерной K_p , локальной K_L и общей K_o коррозии стали 3 от вида обработки. Итоговые зависимости скорости общей коррозии K_o от вида обработки для различного времени испытаний металла представлены на рисунках 3–4.

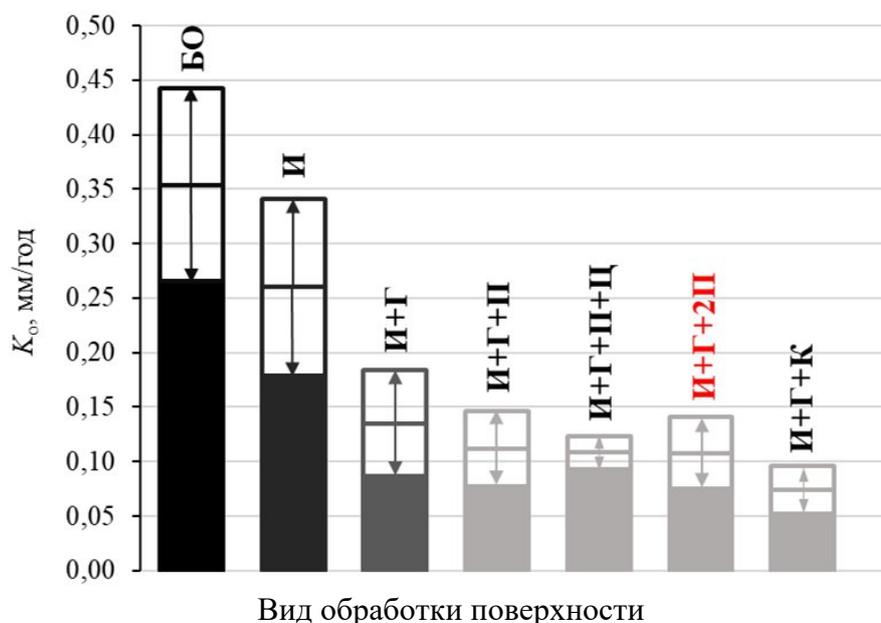


Рисунок 3 – Зависимость скорости **общей** коррозии K_o стали марки Ст3 от вида обработки ее поверхности (**газовая фаза, время испытаний 3 месяца**): БО – без обработки; И – ингибирование; Г – грунтование; П – 1 слой полиакрилата натрия; 2П – 2 слоя полиакрилата натрия; Ц – цапапина; К – краска

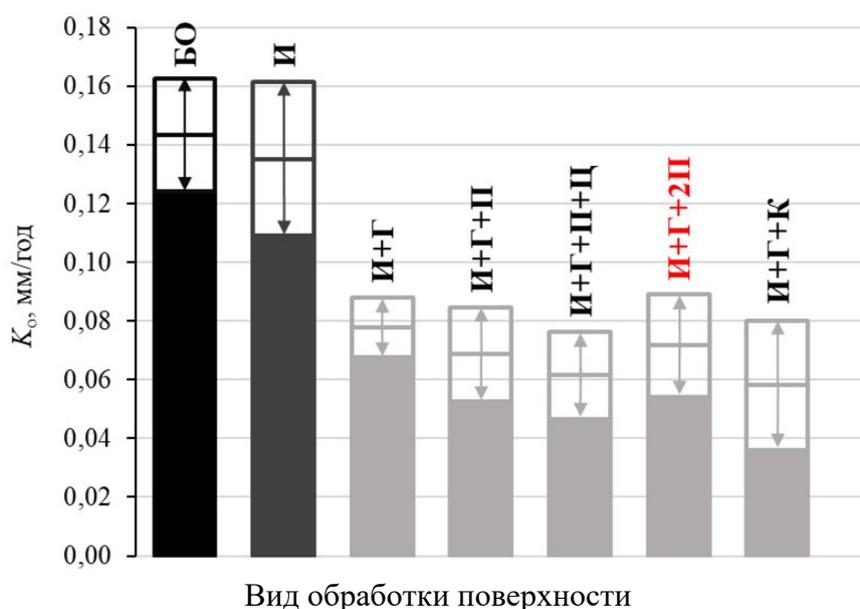


Рисунок 4 – Зависимость скорости **общей** коррозии K_o стали марки Ст3 от вида обработки ее поверхности (**газовая фаза, время испытаний 6 месяцев**): БО – без обработки; И – ингибирование; Г – грунтование; П – 1 слой полиакрилата натрия; 2П – 2 слоя полиакрилата натрия; Ц – цапапина; К – краска

Высокая скорость коррозионного процесса и наиболее плохие его показатели (убыль массы, скорость равномерной, локальной и общей коррозии) характерны для металла, обработанного только ингибированием или ингибированием с последующим грунтованием. Самые высокие результаты показывают образцы из стали марки Ст3, дополнительно покрытые одним или

двумя слоями полиакрилата натрия. Данные тенденции сохраняются при различном времени проведения коррозионных исследований (3 и 6 месяцев).

Основные коррозионные показатели металла, обработанного по различным вариантам, улучшаются с ростом времени его экспозиции в коррозионно-активной среде (для шестимесячных испытаний в 2–3 раза меньше, чем для трехмесячных). Локальное нарушение сплошности покрытия (царапина) не оказывает существенного влияния на показатели коррозии при нанесении всех слоев композиции покрытия (ингибитор, грунтовка, 1 слой полиакрилата натрия) – ухудшение показателей коррозии не превышает 5–30 %.

В третьей главе «Натурные испытания многослойных антикоррозионных покрытий» описан процесс проведения натуральных испытаний антикоррозионных покрытий. Натурные испытания были проведены на нефтяном оборудовании, расположенном на предприятии АО «Самаранефтегаз» (Самарская область) – резервуаре с сернистой нефтью на приемо-сдаточном пункте (ПСП) «Серные воды» и газосепараторе на нефтесборном пункте (НСП) г. Отрадного.

Для размещения в парогазовом пространстве оборудования с сернистой нефтью были изготовлены гирлянды образцов типа «карусель» с кожухом, предохраняющим поверхность образцов от случайного загрязнения нефтью (рисунок 5).



Рисунок 5 – Гирлянда образцов для натуральных испытаний

На гирлянде были размещены образцы с различными вариантами защиты металла от коррозии. Вид обработки поверхности образцов представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Обработка образцов на гирлянде

| № образца | Вид обработки |
|--------------|--|
| 1–12 | 1. Фосфатирование (раствор 87 %-ной ортофосфорной кислоты: $V_{p-ра} = 100$ мл, $V_{H_3PO_4} = 30$ мл, $V_{H_2O} = 70$ мл) |
| | 2. Ингибирование (ингибитор – 25 г/л уротропина + этиловый спирт) |
| | 3. Грунтование (акриловый лак Plastic-71 + этиловый спирт в соотношении 3:1) |
| | 4. 2 слоя покрытия (акриловый лак Plastic-71) |
| 15–26 | 1. Ингибирование |
| | 2. Грунтование |
| | 3. 2 слоя полиакрилата натрия |
| 13–14, 27–28 | Без обработки |

Время натуральных коррозионных испытаний – 6–12 месяцев. Описана методика транспортировки образцов к месту проведения натуральных испытаний и после извлечения из коррозионной среды.

После проведения испытаний образцы были исследованы по методике, аналогичной лабораторному эксперименту: для каждого образца были рассчитаны массовая убыль Δm , скорость равномерной K_p , локальной K_L и общей K_o коррозии (в $\text{мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ и $\text{мм}/\text{год}$).

На основании полученных данных были построены зависимости скорости равномерной K_p , локальной K_L и общей K_o коррозии от вида обработки и времени пребывания металла в коррозионной среде для различного типа нефтяного оборудования (РВС с сернистой нефтью и газосепаратор). На рисунках 6–7 представлены эмпирические зависимости скорости общей коррозии стали 3 от вида обработки и времени испытаний для различного оборудования.

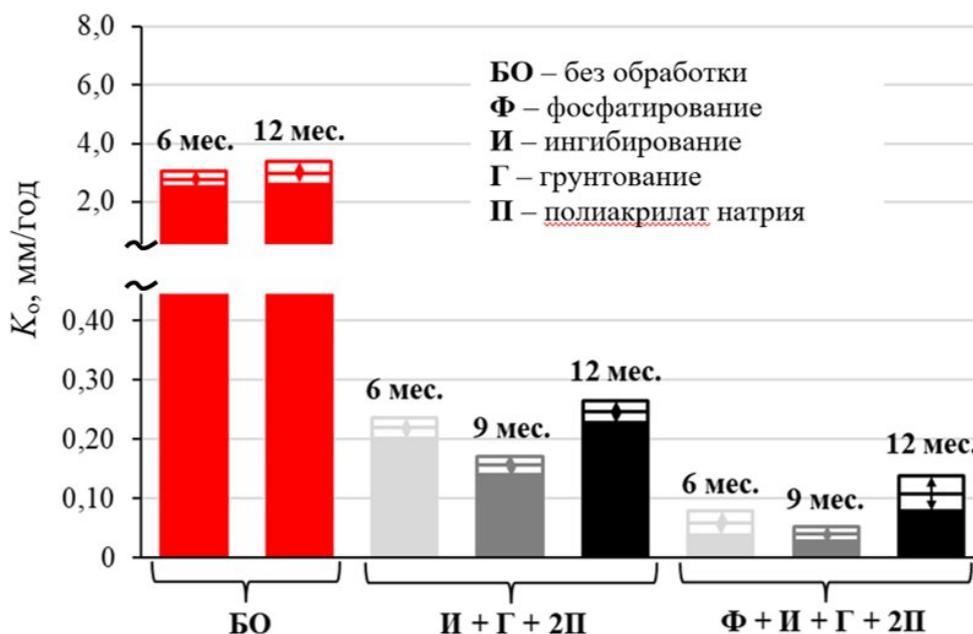


Рисунок 6 – Зависимость скорости **общей** коррозии K_o стали марки Ст3 от вида обработки поверхности и времени испытаний (РВС с сернистой нефтью)

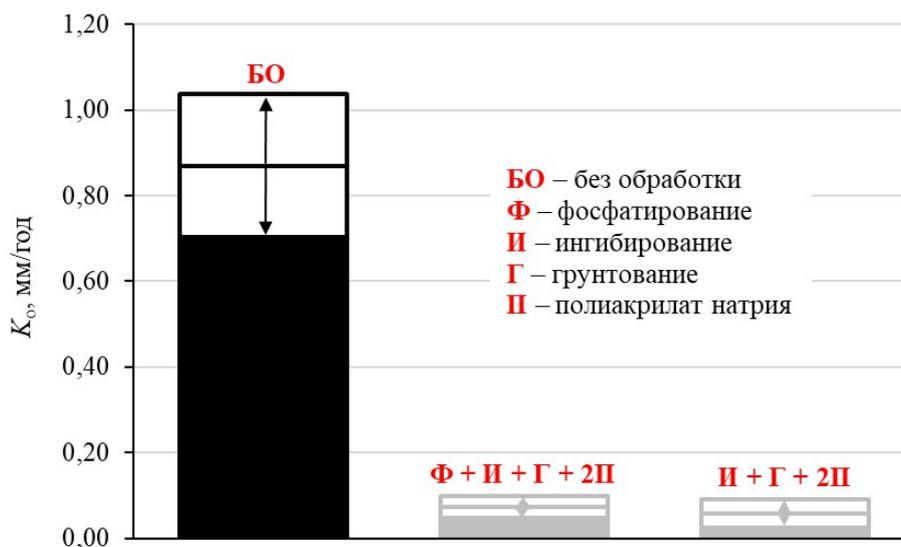


Рисунок 7 – Зависимость скорости **общей** коррозии K_0 стали марки Ст3 от вида обработки поверхности и времени испытаний (**газосепаратор**)

Проведение исследований в нефтяном оборудовании подтвердило эффективность разработанного антикоррозионного лакокрасочного покрытия. Таким образом, по результатам натуральных испытаний показана эффективность многослойного лакокрасочного покрытия, включающего следующие виды обработки: фосфатирование, ингибирование, грунтование, 2 слоя полиакрилата натрия. Также экспериментально подтверждено значительное увеличение защитной способности покрытия при включении в его состав фосфатной пленки.

Используя результаты натуральных испытаний, был сделан расчет времени до появления первых сквозных коррозионных поражений для нефтяного оборудования из стали марки Ст3 с различными вариантами защиты от коррозии. Расчет произведен для РВС с сернистой нефтью и газосепаратора. Для вычислений использованы средние значения скорости общей коррозии, толщина металла – 3 мм (толщина кровли и верхних поясов). Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет времени до появления первых сквозных коррозионных поражений

| Тип оборудования | Вид обработки | K_0 , мм/год | Время до появления сквозных поражений, год |
|------------------------|-----------------|----------------|--|
| РВС с сернистой нефтью | БО | 2,883 | 1,0 |
| | И+Г+2П | 0,207 | 14,5 |
| | Ф+И+Г+2П | 0,070 | 42,9 |
| Газосепаратор | БО | 0,865 | 3,5 |
| | И+Г+2П | 0,058 | 51,7 |
| | Ф+И+Г+2П | 0,071 | 42,2 |

Примечание: БО – без обработки, Ф – фосфатирование, И – ингибирование, Г – грунтование, 2П – 2 слоя полиакрилата натрия

Время до появления первых сквозных поражений на нефтяном оборудовании, поверхность которого обработана разработанным антикоррозионным лакокрасочным покрытием, составит более 40 лет. Это время превышает как минимальный срок службы резервуара типа РВС (25 лет), так и требуемый срок службы защитного покрытия (не менее 10 лет).

Время до появления первых сквозных поражений для различных вариантов защиты оборудования от коррозии и образования пиррофорных отложений рассчитано по результатам натуральных испытаний продолжительностью не более 1 года. С течением времени процесс коррозии замедляется. Поэтому полученные временные показатели могут быть скорректированы в сторону увеличения.

Рассчитана скорость образования пиррофорных коррозионных отложений для необработанной поверхности (сталь марки Ст3, чистый металл) и для поверхности, обработанной разработанным лакокрасочным покрытием. Сделан расчет времени достижения слоем пиррофоров толщины 3 мм (возникнет опасность самовозгорания) для различного типа оборудования. Данные расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры роста пиррофорных отложений на поверхности нефтяного оборудования

| Тип оборудования | Вид обработки | K_o , мм/год | K_p , мм/год | τ_3 мм, год |
|------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| РВС с сернистой нефтью | БО | 2,883 | 83,3 | 0,04 |
| | И+Г+2П | 0,207 | 6,0 | 0,50 |
| | Ф+И+Г+2П | 0,070 | 2,0 | 1,50 |
| Газосепаратор | БО | 0,865 | 25,0 | 0,12 |
| | И+Г+2П | 0,058 | 1,7 | 1,76 |
| | Ф+И+Г+2П | 0,071 | 2,1 | 1,43 |

Примечание: БО – без обработки, Ф – фосфатирование, И – ингибирование, Г – грунтование, 2П – 2 слоя полиакрилата натрия

Выявлено, что время до достижения слоем пиррофорных коррозионных отложений толщины 3 мм для оборудования, эксплуатирующегося в коррозионно-активной среде, 1,5 года. Для необработанного металла этот показатель значительно меньше (0,5–1,5 месяца). Это говорит о необходимости периодической очистки поверхности оборудования от образовавшихся пиррофорных отложений даже при использовании защитного покрытия и отслеживания случаев разгерметизации, не связанных с протеканием коррозионных процессов.

В четвертой главе «Основные свойства защитного покрытия, определяющие пожаровзрывобезопасность резервуаров с сернистой нефтью» приведены результаты определения сплошности покрытия коррозионно-электрохимическими методами. Исследование проведено для пяти вариантов обработки поверхности металла: 1) без обработки (чистый металл); 2) ингибирование; 3) ингибирование, грунтование; 4) ингибирование,

грунтование, 1 слой полиакрилата натрия; 5) ингибирование, грунтование, 2 слоя полиакрилата натрия.

В качестве рабочих электродов были использованы такие же образцы, что и для лабораторных и натуральных коррозионных испытаний. На образец был нанесен проверяемый вид покрытия. Площадь рабочей (поляризуемой) поверхности – 1 см².

Рабочий электрод был помещен в электролит, представляющий собой модель конденсата влаги, образующегося на внутренней поверхности резервуара с сернистой нефтью. Для создания коррозионно-электрохимической системы использована трехэлектродная электрохимическая ячейка с разделенными пространствами (пространства рабочего электрода, электрода сравнения, вспомогательного электрода).

Лабораторная установка для коррозионно-электрохимических испытаний представлена на рисунке 8. Перед проведением испытаний была осуществлена продувка системы газообразным азотом в течение одного часа, продувка ячейки перед заполнением пространства рабочего электрода рабочим раствором проведена в течение 15 минут.

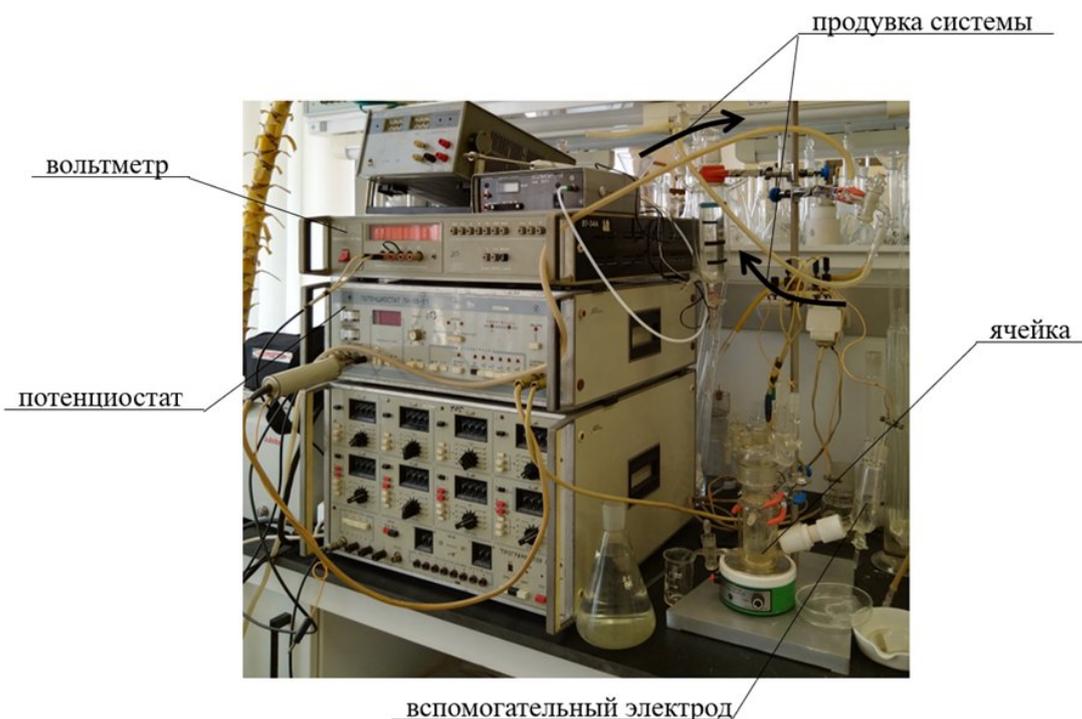


Рисунок 8 – Лабораторная установка для коррозионно-электрохимических исследований

Экспериментально установлено, что оптимальным временем проведения одного электрохимического испытания является 40 минут. За это время происходит стабилизация тока растворения металла. На основе проведенных коррозионно-электрохимических исследований построены хроногальванометрические кривые (рисунок 9), представляющие собой зависимость десятичного логарифма плотности тока растворения металла, обработанного определенным образом, от времени поляризации.

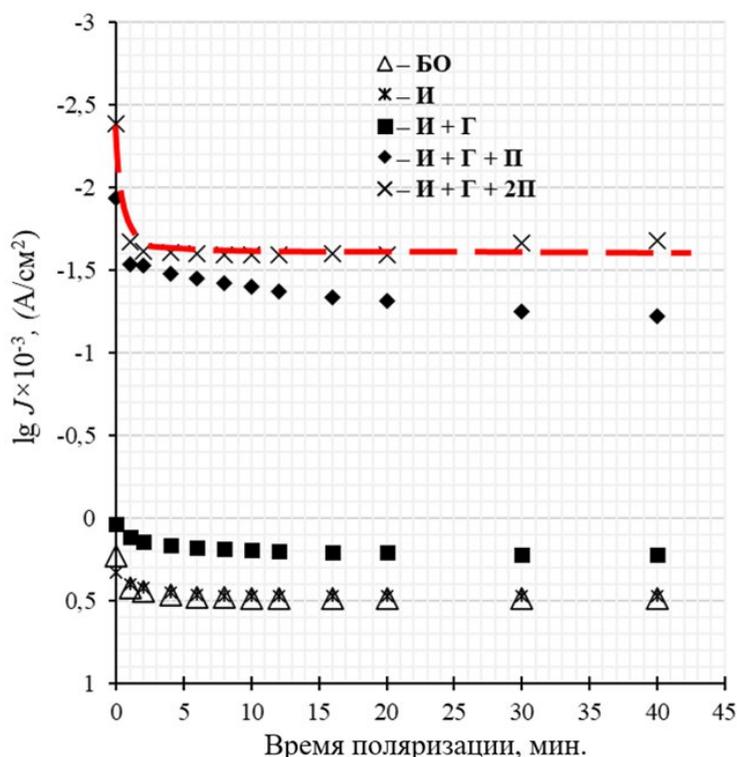


Рисунок 9 – Зависимость плотности тока растворения металла J от времени поляризации рабочей поверхности металла, обработанной различными способами: БО – без обработки; И – ингибирование; Г – грунтование; П – полиакрилат натрия

Самую высокую эффективность защитного действия показала обработка, включающая последовательное нанесение ингибитора, грунтовки и полиакрилата натрия. При обработке поверхности металла указанным многослойным лакокрасочным покрытием скорость образования пиррофорных отложений минимальна и составляет 0,07 мм/год.

С целью исследования влияния открытого источника горения на характеристики разрабатываемого антикоррозионного покрытия, а также поведения данного материала в условиях пожара была определена температура воспламенения различных лакокрасочных покрытий. Большинство существующих лакокрасочных материалов изготавливается на эпоксидной основе. В разрабатываемой антикоррозионной композиции финишный барьерный слой представляет собой состав на акриловой основе. Было испытано три материала в затвердевшем состоянии: акриловый лак, эпоксидная смола и эпоксидная краска.

Эксперименты были проведены в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Для проведения эксперимента было изготовлено по 10–15 образцов каждого материала. Образцы представляли собой круги диаметром 45 ± 1 мм, масса каждого образца – $3,0 \pm 0,1$ г. Образцы были доведены до полного высыхания и затвердевания. Фотографии образцов каждого вещества представлены на рисунке 10.

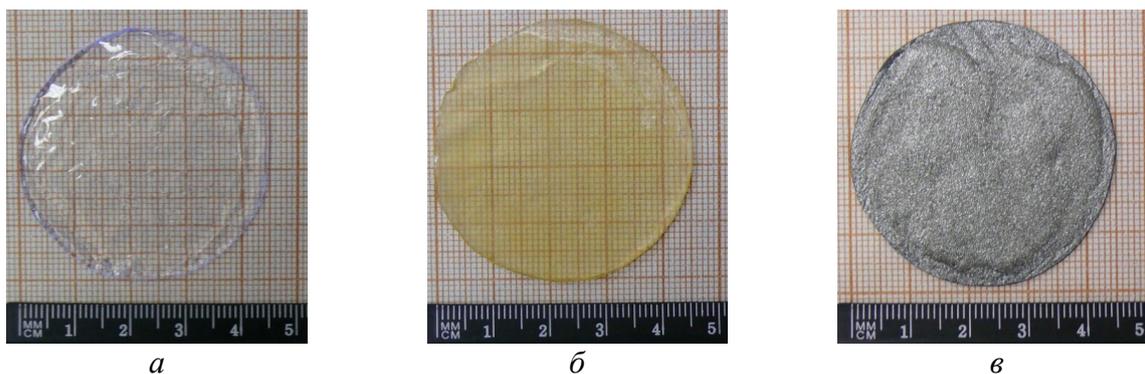


Рисунок 10 – Образцы для испытаний: *а* – из акрилового лака; *б* – из эпоксидной смолы; *в* – из эпоксидной краски

Установлены температуры воспламенения трех веществ: акрилового лака (165 °С), эпоксидной краски (227 °С), эпоксидной смолы (310 °С). У акрилового лака самая низкая сопротивляемость периодическому воздействию открытого источника горения. Также в ходе эксперимента произведено отслеживание поведения исследуемых материалов.

Покрытия на эпоксидной основе имеют толщину 300–500 мкм и при воздействии высоких температур вспучиваются, наблюдается обильное выделение дыма, открытое горение. Толщина разработанного антикоррозионного покрытия при максимальном количестве функциональных слоев (пассивирующий фосфатный слой, слой ингибированного металла, грунтовочный слой и два финишных барьерных слоя полиакрилата натрия) не превышает 50 мкм. Это позволяет отнести разработанное покрытие к категории термически тонких, поэтому даже при разогреве пирофорных отложений тонкий слой покрытия не будет разогреваться. Тепло будет быстро отводиться холодной стальной подложкой. Кроме того, в условиях нагрева покрытия на акриловой основе вскипают и быстро сходят с поверхности, выделение дыма минимально, открытого горения не наблюдается.

Таким образом, несмотря на относительно низкую сопротивляемость акрилового покрытия воздействию высоких температур, разработанный лакокрасочный материал в условиях пожара будет меньше способствовать распространению пожара на оборудовании с сернистой нефтью, чем покрытия на эпоксидной основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ пожаров на объектах нефтегазовой отрасли промышленности показал, что их ежегодное количество увеличивается. Одна из причин пожаров – самовозгорание пирофорных коррозионных отложений. Выявлена необходимость разработки более эффективных методов антикоррозионной защиты, в том числе с использованием многослойных лакокрасочных покрытий. Учитывая недостаточный срок службы современных покрытий (2–4 года при требуемом не менее 10 лет), необходима разработка антикоррозионного покрытия с более высокой эффективностью защитного действия.

2. Разработана методика определения эффективности защитного действия многослойных антикоррозионных составов. Выбрана оптимальная композиция лакокрасочного покрытия с учетом влияния состава каждого из его слоев на эффективность защитного действия: ингибированный слой, обеспечивающий защиту металла при нарушении целостности внешних слоев; слой грунтовки, обеспечивающий высокую адгезию барьерных слоев к поверхности металла; внешний барьерный слой покрытия на основе полиакрилата натрия.

3. Проведены лабораторные испытания металла (сталь марки Ст3) с различными видами обработки поверхности. Наибольшая эффективность защитного действия соответствует многослойному лакокрасочному покрытию, состоящему из следующих последовательно нанесенных слоев: ингибированный слой (раствор уротропина в этиловом спирте), слой грунтовки (раствор полиакрилата натрия в этиловом спирте), внешний барьерный слой покрытия на основе полиакрилата натрия. Основные коррозионные показатели (массовая убыль, скорость равномерной, локальной, и общей коррозии) металла, обработанного данным лакокрасочным покрытием, в 2–3 раза ниже, чем для необработанного металла. Предложено использование в качестве дополнительного слоя покрытия фосфатной пленки.

4. Проведены натурные испытания образцов стали марки Ст3, защищенных разработанным лакокрасочным покрытием, на нефтяном оборудовании, расположенном на предприятии АО «Самаранефтегаз» (Самарская область) – газосепараторе на нефтесборном пункте в г. Отрадном и резервуаре с сернистой нефтью на приемо-сдаточном пункте «Серные воды». Время проведения испытаний – 6–12 месяцев. Основные коррозионные показатели для металла, обработанного защитным антикоррозионным покрытием, в 10 раз ниже, чем для необработанного металла.

5. Определено время до возникновения пожароопасной ситуации для РВС с сернистой нефтью и газосепаратора при использовании незащищенного металла (0,5–1,5 месяца) и при защите разработанным покрытием (приблизительно 1,5 года). Время до появления первых сквозных поражений на нефтяном оборудовании, поверхность которого обработана разработанным антикоррозионным лакокрасочным покрытием, составит более 40 лет. Это время превышает как минимальный срок службы резервуара типа РВС (25 лет), так и срок службы защитного покрытия (не менее 10 лет).

6. Определена температура воспламенения разработанного покрытия (на акриловой основе) в сравнении с используемыми в настоящее время лакокрасочными покрытиями (на эпоксидной основе). Температура воспламенения указанных материалов составляет: акриловый лак – 165 °С, эпоксидная краска – 227 °С, эпоксидная смола – 310 °С. Показано, что при использовании разработанного покрытия пожары и взрывы на резервуарах с сернистой нефтью не возможны вследствие разгерметизации, связанной с протеканием коррозионных процессов на внутренней поверхности кровли и верхних поясов РВС.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях, включенных в список ВАК

1. Петрилин, Д.А. Анализ пожаровзрывоопасности образования коррозионных отложений на внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 3 (97). – С. 74-83.
2. Петрилин, Д.А. Первичная обработка поверхности стали для предотвращения преждевременного разрушения нефтяных резервуаров / Д.А. Петрилин, И.И. Ащеулова, И.Р. Бегишев, И.И. Реформатская // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 4. – С. 77-83.
3. Петрилин, Д.А. Взаимосвязь конденсации влаги и образования пирофорных соединений в парогазовом пространстве резервуаров с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин, И.И. Ащеулова, И.Р. Бегишев [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 60-69.
4. Петрилин, Д.А. Исследование зависимости температуры самовоспламенения от концентрации паров горючей жидкости / Д.А. Петрилин, И.Р. Бегишев, И.И. Реформатская [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 1. – С. 14-22.

Публикации в международных журналах, индексируемых в базе данных Scopus

5. Petrilin, D.A. Inhibition of the formation of pyrophoric corrosion deposits / D.A. Petrilin, I.I. Reformatskaya, I.R. Begishev, I.I. Ascheulova, A.N. Podobaev, A.V. Baburin // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2023. – Vol. 97, No. 4. – Pp. 241-244.
6. Петрилин, Д.А. Ингибирование образования пирофорных коррозионных отложений / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.Р. Бегишев [и др.] // Журнал физической химии. – 2023. – Т. 97, № 4. – С. 570-574.
7. Петрилин, Д.А. Коррозионно-электрохимические исследования стали марки Ст3 с различными видами обработки / Д. А. Петрилин, И. И. Реформатская, И. И. Ащеулова // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 7. – С. 74-80.

Остальные публикации по теме диссертации

8. Петрилин, Д.А. Мониторинг коррозионного состояния нефтяных резервуаров как метод повышения пожаровзрывобезопасности при их эксплуатации / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2020. – № 29. – С. 151-154.
9. Петрилин, Д.А. Организация мониторинга образования пирофорных отложений в резервуарах с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Материалы IX всероссийской научно-практической

конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности». – 2020. – С. 54-56.

10. Петрилин, Д.А. Взаимосвязь противопожарной и противокоррозионной защиты нефтяных резервуаров / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В четырех частях, Москва, 01 марта 2021 года. Том Ч. II. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2021. – С. 207-210.

11. Петрилин, Д.А. Предотвращение коррозии нефтяных резервуаров как превентивная мера повышения их пожаробезопасности / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2021. – № 10. – С. 70-74.

12. Петрилин, Д.А. Нормативно-правовое регулирование в области защиты нефтяных резервуаров от коррозии / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации». – г. Екатеринбург. – 2021. – С. 96-100.

13. Петрилин, Д.А. Обеспечение пожаровзрывобезопасности резервуаров с сернистой нефтью путем защиты их внутренней поверхности от образования коррозии / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2021. – № 30. – С. 168-171.

14. Петрилин, Д.А. Образование свободной серы в резервуарах с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин, А.В. Бабурин, И.И. Реформатская [и др.] // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, в 2 ч., Москва, 17–18 марта 2022 года. Том Часть 1. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 341-344.

15. Петрилин, Д.А. Пожарная безопасность вертикальных стальных резервуарах с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2022. – № 11. – С. 86-90.

16. Петрилин, Д.А. Нейросетевое моделирование долговечности алюминиевых понтонов / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.Р. Бегишев, А.В. Бабурин // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны. – г. Иваново. – 2022. – С. 314-318.

17. Петрилин, Д.А. Роль химического состава коррозионных отложений в процессе возгорания нефтяных резервуаров / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, А.В. Бабурин, И.И. Ащеулова // Журнал «Пожарная и

техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования». – № 2 (12). – 2022. – С. 206-209.

18. Петрилин, Д.А. Коррозионные пиррофорные отложения на поверхности нефтяных резервуаров как источник возникновения пожаров / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. – г. Железногорск. – 2022. – С. 61-63.

19. Петрилин, Д.А. Кафедра процессов горения и экологической безопасности Академии Государственной противопожарной службы МЧС России: славное прошлое - перспективное будущее / Д.А. Петрилин, И.П. Елтышев, П.С. Копылов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 312-325.

20. Петрилин, Д.А. Анतिकоррозионная защита резервуаров с сернистой нефтью как мера профилактики пожаров / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – г. Кокшетау, Казахстан. – 2022. – С. 132-136.

21. Петрилин, Д.А. Подготовка поверхности нефтяных резервуаров к обработке антикоррозионными лакокрасочными покрытиями / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России. Том Часть 1. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 152-156.

22. Петрилин, Д.А. Влияние фосфатирования на коррозию стальной поверхности / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.И. Ащеулова // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны в Год 90-летия со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях, Москва, 01 марта 2023 года. Том Часть II. – Москва: Академия ГПС МЧС России. – 2023. – С. 375-380.

23. Петрилин, Д.А. Фосфатирование как способ защиты оборудования от коррозии и образования пиррофорных отложений / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.И. Ащеулова // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2023. – № 12. – С. 26-31.

24. Петрилин, Д.А. Влияние качества резервуарных сталей на пожаробезопасность вертикальных стальных резервуаров / Д.А. Петрилин, А.И. Туболев // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2023. – № 12. – С. 32-35.

25. Петрилин, Д.А. Влияние различных видов обработки на скорость равномерной и локальной коррозии для стали Ст3 / Д.А. Петрилин,

И.И. Реформатская, И.И. Ащеулова // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 2. – С. 78-81.

26. Петрилин, Д.А. Применение уротропина при антикоррозионной защите резервуаров с сернистой нефтью / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.И. Ащеулова // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 387-390.

27. Петрилин, Д.А. Защита резервуаров с нефтепродуктами с применением защитных покрытий / Д.А. Петрилин, А.И. Туболев, И.И. Реформатская // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 507-511.

28. Петрилин, Д.А. Разработка лакокрасочного покрытия для защиты нефтяного оборудования от коррозии / Д.А. Петрилин, И.И. Реформатская, И.И. Ащеулова // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Устойчивость материалов к внешним воздействиям». – г. Химки. – 2023. – С. 140-145.

29. Петрилин, Д.А. Загрязнения окружающей среды от объектов нефтехимической промышленности / Д.А. Петрилин, С.Ю. Волков, И.И. Реформатская // Экологические проблемы XXI века: Материалы XV Научно-практической конференции слушателей и молодых ученых, Москва, 25 мая 2023 года / Сост. Т.Г. Грушева [и др.]. Под общей редакцией Т.Г. Грушевой. – Москва: Академия ГПС МЧС России. – 2023. – С. 101-103.

30. Петрилин, Д. А. Лабораторный стенд для исследований образования коррозионных отложений на нефтяном оборудовании / Д. А. Петрилин, И. И. Реформатская // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2024. – № 13. – С. 17-22.

Подписано в печать 10.12.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 546.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4