

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.01 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Повышение ресурсов оборудования анаэробного сбраживания

Студент

В.Р. Гайнутдинов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.С. Гончаров

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

И.Ю. Усатова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Аннотация

Выпускная квалификационная работа изложена на 69 страницах, включая 18 рисунков, 20 таблицы и списка используемых источников.

Ключевые слова: метантенк, анаэробное сбраживание, коррозия, антикоррозионное покрытие.

Цель работы: повышение ресурсов оборудования анаэробного сбраживания.

Графическая часть работы выполнена на 31 листах (18 рисунков и 20 таблицы) и включает в себя технологическую схему биоэнергетической установки по переработке отходов фермы КРС, схему горизонтального метантенка.

Пояснительная записка включает в себя два раздела.

В теоретической части рассмотрена проблема агрессивного коррозионного воздействия органических отходов и окружающей среды на внутреннюю и внешнюю поверхности метантенка и всех прилегающих систем. Проведен поиск патентной информации.

В технологической части описаны способ решения проблемы коррозии металла применением антикоррозионного покрытия, а также приведены расчетные обоснования использования покрытий с точки зрения тепловых потерь, а также экономический расчет.

Abstract

The final qualification work consists of 68 pages, 18 figures, 20 tables, 31 sources are used.

Key words: digester, anaerobic digestion, corrosion, anticorrosion coating.

Objective: to increase the resources of anaerobic digestion equipment.

The graphic part of the work was done on 31 sheets (18 figures and 20 tables) and includes a technological scheme of a bioenergy plant for processing waste from cattle farms, a horizontal digester scheme.

The explanatory note includes two sections.

In the theoretical part, the problem of the corrosive effects of organic waste and the environment on the inner and outer surfaces of the digester and all the attached systems is considered. Search for patent information.

In the technological part, a method for solving the problem of metal corrosion using an anti-corrosion coating is described, as well as calculation justifications for the use of coatings in terms of heat loss, as well as an economic calculation are presented.

Graduation work was done in a text editor Microsoft Word 2010.

Содержание

Введение.....	6
1 Литературный обзор.....	8
1.1 Общая технологическая схема биоэнергетической установки.....	8
1.2 Коррозионная агрессивность сырья по отношению к внутренней поверхности метантенка и трубопровода как одна из основных проблем технологии.....	11
1.3 Коррозионная агрессивность сырья по отношению к внешней поверхности метантенка и трубопровода.....	19
2 Исследование возможности применения антикоррозионного покрытия как способа повышения ресурса работы оборудования анаэробного сбраживания.....	25
2.1 Основные методы повышения коррозионной стойкости оборудования.....	25
2.2 Расчетное обоснование применения покрытия.....	29
2.3 Отчет о патентных исследованиях.....	35
2.4 Внутреннее антикоррозийное покрытие метантенка.....	38
2.5 Внешнее антикоррозийное покрытие метантенка.....	46
2.6 Экономическое обоснование предлагаемого покрытия.....	51
Заключение.....	65
Список используемых источников.....	66

Список сокращений

КРС – Крупнорогатый скот.

ГПН – Газопламенное напыление.

КПД – Коэффициент полезного действия.

Введение

Глобальный интерес к развитию биогазовых технологий можно объяснить тем, что получаемый продукт хорошо знаком потребителю и является максимально приближенным аналогом природного газа, а сама технология получения – моделью природных процессов, локализованных в технологических установках и форсированных с помощью технических средств.

Немаловажным аспектом, говорящим в поддержку развития биогазовых технологий, является то, что с их помощью решается еще одна глобальная проблема человечества – накопление огромного количества отходов. Согласно статистическим данным, количество производимых отходов на территории РФ постоянно увеличивается, за последнее десятилетие в отдельных федеральных округах этот прирост составил до 130 % [1]. Рост количества производимых отходов сопровождается и ростом площадей, отводимых под свалки. При этом огромная часть размещаемых на полигонах отходов являются ценным ресурсом, в том числе энергетическим.

Развитие биогазовых технологий позволяет получить чистый «природный» энергетический ресурс, сократить количество площадей, занимаемых отходами, а также обезвредить обрабатываемое сырье и этим улучшить эпидемическую ситуацию.

Основным вопросом применимости технологии служит количество затрат на применяемое оборудование – как капитальных, так и эксплуатационных. Коррозионная активность перерабатываемой среды – навоза КРС и свиного, куриного помёта, других органических отходов – оказывают разрушающее действие на материалы, используемые при изготовлении резервуаров метанореакторов, контактного оборудования и арматуры. Для снижения коррозионного воздействия и тем самым увеличения ресурса службы установок целесообразно применять

антикоррозионные покрытия, устойчивые к воздействию конкретных составляющих обрабатываемого субстрата, а также температуры.

Целью данной работы является повышение рабочего ресурса оборудования анаэробного сбраживания путем предотвращения коррозии его отдельных элементов.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- 1) провести поиск научной информации о явлении коррозии поверхностей металла;
- 2) определить целесообразность и перспективность применения антикоррозионных покрытий;
- 3) рассмотреть предлагаемое покрытие для предупреждения возникновения коррозии внутренней поверхности оборудования и трубопровода с целью увеличения ресурса его службы;
- 4) рассмотреть предлагаемое покрытие для предупреждения возникновения коррозии внешней поверхности оборудования и трубопровода с целью увеличения ресурса его службы;
- 5) провести расчетное обоснование применения предлагаемого покрытия.

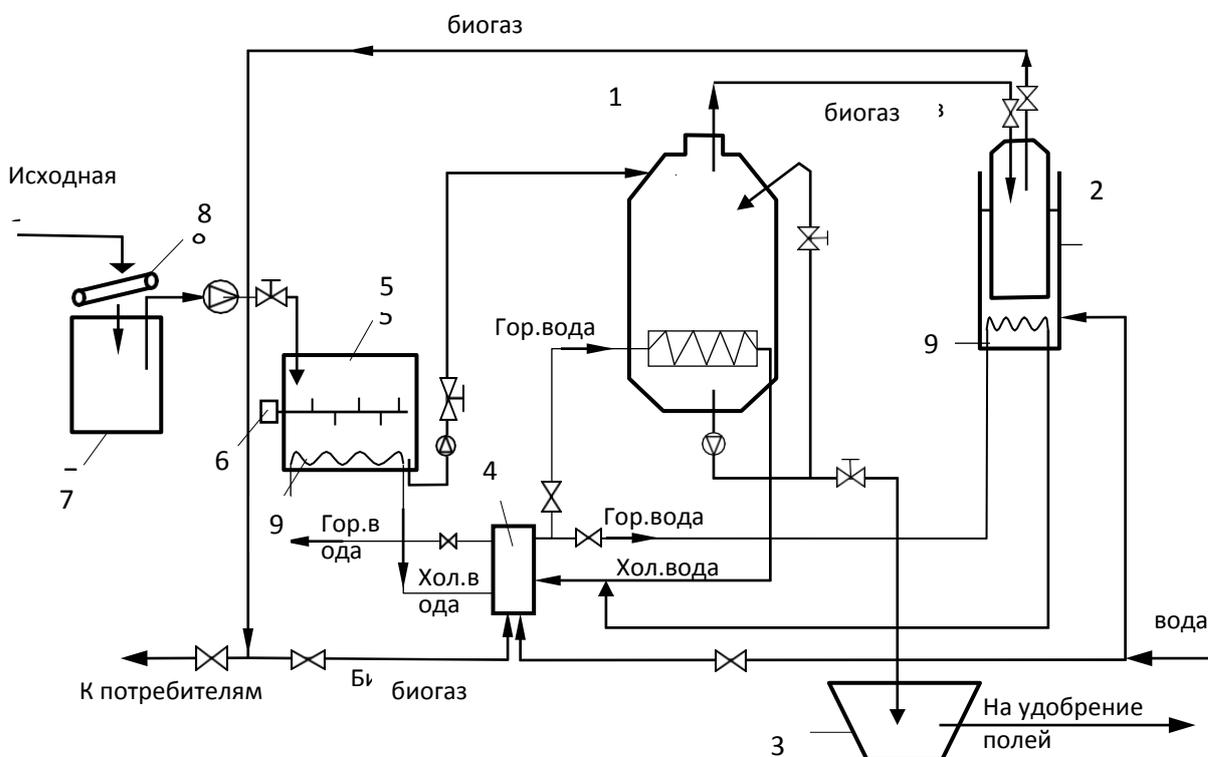
Предмет исследования – антикоррозионная защита материалов в процессе анаэробного сбраживания органического сырья.

Объектом исследования являются антикоррозионные покрытия, применяемые для защиты поверхностей резервуаров и оборудования, соприкасающихся с агрессивными обрабатываемыми средами. А также покрытия, применяемые для защиты от внешних агрессивных воздействий окружающей среды на поверхности трубопровода.

1 Литературный обзор

1.1 Общая технологическая схема биоэнергетической установки

Для примера коррозионного воздействия на поверхности металлоконструкций рассмотрим технологическую схему метанового брожения навоза крупного рогатого скота в метантенке в Московской области, которая была разработана Всероссийским НИИ, представленная на рисунке 1.



1 – метантенк; 2 – мокрый газгольдер; 3 – хранилище сброженного субстрата; 4 – водонагреватель; 5 – емкость предварительного нагрева сбраживаемой биомассы; 6 – мешалка; 7 – накопитель исходной биомассы; 8 – отделитель посторонних включений; 9 – теплообменник

Рисунок 1 – Технологическая схема биоэнергетической установки по переработке отходов фермы КРС

Технологическая схема установки включает в себя следующие элементы: система управления и энергоснабжения, мокрый газгольдер, система предварительного подогрева навоза, метантенк.

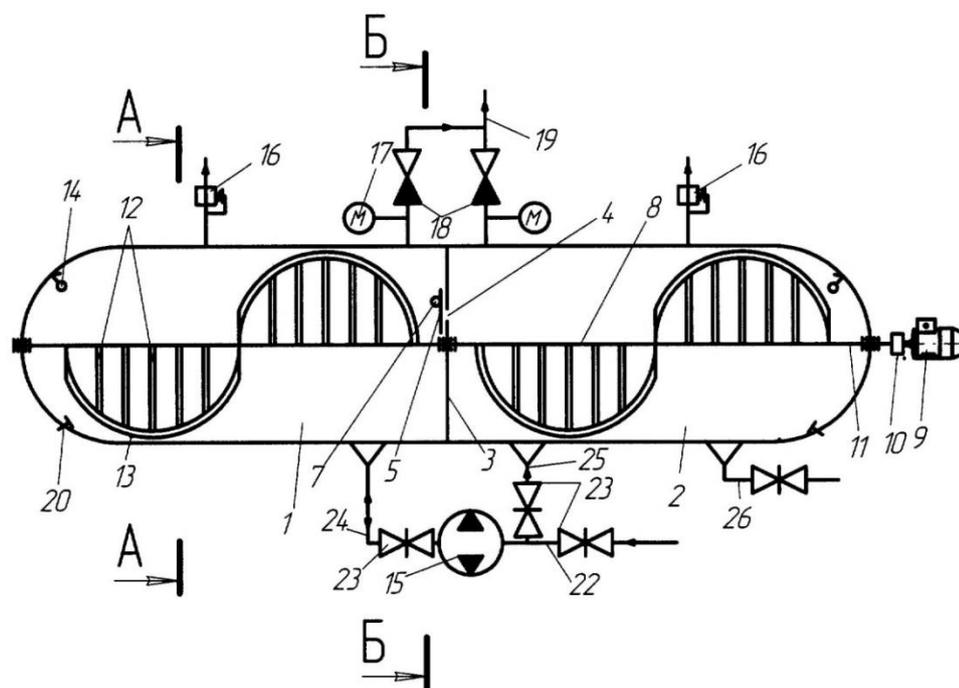
1.1.1 Биогазовая установка горизонтального типа

В ходе выполнения патентного поиска по существующим разработкам горизонтальных реакторов для анаэробного сбраживания органических отходов целью было выявить наиболее целесообразные и удобные в применении концептуальные модели, на основе которых можно проводить исследования и работы по усовершенствованию и повышению ресурсов работы путем применения антикоррозионных покрытий.

Горизонтальный метантенк для биогазовых установок (патент RU 2 281 254 С), представлен на рисунке 2.

Изобретение представляет собой горизонтальную цилиндрическую емкость, разделенную центральной герметичной неподвижной перегородкой на камеры первой и второй половины брожения; камеры оснащены общей мешалкой. В состав установки входят электромагнитный обогреватель и реверсивный насос.

В перегородке между камерами организовано окно, которое в открытом положении позволяет части материала перемещаться из первой камеры во вторую без дополнительных затрат энергии. Реверсивная мешалка состоит из вала и закрепленных на нём спиц-лопаток, на которые навита винтовая шнековая полоса. Реверсивное вращение лопаток и шнековой полосы обеспечивают оптимальное перемешивание и позволяют мешалке эффективно самоочищаться. Выгрузка биомассы через окно регулируется датчиком нижнего уровня, что обеспечивает постоянное наличие бактериальной «закваски» для вновь загружаемого сырья. Электромагнитный обогреватель поддерживает работу метантенка в заданном температурном режиме.



1 – камера первой половины брожения, 2 – камера окончательного брожения, 3- герметичная перегородка, 4 – окно, 5 задвижка закрытия-открытия окна, 6 – штурвал задвижки, 7 – реечный механизм, 8 – единая реверсивная мешалка, 9 – мотор-редуктор, 10 – предохранительная муфта, 11 – вал мешалки, 12 – спицы-лопатки, 13 – винтовая шнековая полоса, 14 – датчики заполнения камер, 15 – насос подачи сырья, 16 - предохранительные клапаны, 17 – манометр, 18 – обратные проходные клапаны, 19 – магистраль отведения биогаза, 20 – датчик нижнего уровня субстрата, 21 – электромагнитный обогреватель, 22 – заправочная магистраль, 23 – задвижка, 24 – магистраль соединения насоса с камерой 1, 25 – магистраль соединения насоса с камерой 2, 26 – магистраль выгрузки сброженной массы.

Рисунок 2 – Схема горизонтального метантенка

С точки зрения подверженности коррозии необходимо отметить, что данный аппарат и все элементы технологической схемы, описанной в главе 1.1 при исполнении из стали подвержен следующим видам воздействий:

- 1) Механическое воздействие при попадании в камеры реактора твердых включений, регулярно перемещаемых при перемешивании сброживаемой массы, а также перекачиваемых по магистралям из камеры 1 в камеру 2.

- 2) Агрессивное воздействие сбрасываемой массы, относящейся по своей сути к высококонцентрированным жидким отходам с существенной микроорганизменной составляющей.
- 3) Газовая коррозия, вызываемая смесью вырабатываемых веществ в составе биогаза (в первую очередь, водорода и метана).
- 4) Усугубление газовой коррозии нагреванием сбрасываемой массы (и самого реактора) до температуры, необходимой для протекания технологических процессов.
- 5) Внешнее агрессивное воздействие окружающей среды.

Снижение долговечности и несущей способности метантенка является непосредственным следствием процесса разрушения поперечного сечения металла коррозионным воздействием. В результате этого на поверхности металла образуются щели и свищи, через которые в грунт попадают жидкие органические примеси. Также в образовавшиеся отверстия в куполе метантенка происходит утечка биогаза, что приводит к большим потерям КПД аппарата. Для того чтобы предотвратить данные процессы необходима обработка внутренней и внешней поверхности аппарата антикоррозионными покрытиями.

1.2 Коррозионная агрессивность сырья по отношению к внутренней поверхности метантенка и трубопровода как одна из основных проблем технологии

Внутреннее пространство реактора-метантенка и размещенного в нем оборудования в процессе работы постоянно соприкасается с агрессивными средами. Подаваемое в обработку сырье должно обладать определенным уровнем pH, который для некоторых условий понижается до значения 4. Далее, в процессе обработки и всё большего закисления, производится нейтрализация, при которой происходит соприкосновение с щелочными реагентами и резкая смена реакции среды.

Отсутствие кислорода рассматривается как фактор, снижающий коррозионную агрессивность среды. Однако, образование оксидной пленки на внутренней поверхности реактора при низкой ее пористости является защитным механизмом, сдерживающим коррозию [2]. Плотность оксидной пленки зависит от соотношения объема окислившегося металла V_{Me} и объема образовавшейся пленки $V_{ок}$. Если выполняется условие $V_{ок}/V_{Me} > 1$, то пленка считается плотной и сплошной, выполняющей функцию защиты от коррозии. Поэтому можно предположить, что отсутствие кислорода также и лишает реактор дополнительной защиты.

Не лучшим образом влияет на материал исполнения самого резервуара и разница температур внутренней и внешней сред, а также агрессивные природные условия эксплуатации оборудования. Устройство теплоизоляции резервуара направлено на создание наиболее выгодного теплового баланса работы оборудования, а также снижение влияния факторов агрессивности внешней среды, при этом износостойкость и ресурс работы метантенка могут быть существенно увеличены.

Проблемы износостойкости и увеличения ресурса работы характерны в основном для промышленных установок большой производительности. Частные биогазовые установки исполняют из современных полимерных материалов, при необходимости делая металлическую обрешетку, не соприкасающуюся с внутренней агрессивной средой. В таблице 2 приведено сравнение степени агрессивности сточных вод, подвергающихся биологической очистке, на разных стадиях процесса [3].

Как видно из представленной информации, агрессивность органического субстрата для процесса анаэробного сбраживания в метантенке напрямую связывают с микробиологической составляющей. Так, в анаэробных условиях при восстановлении отдельных соединений (например, сульфатов в сульфиды) происходит высвобождение кислорода, являющегося катодным деполяризатором коррозионных процессов.

Таблица 2 – степени агрессивности сточных вод на различных этапах биологической очистки

Сооружение	Оценка сульфатной агрессивности по СНиП 2.03.11-85		Агрессивность, определяемая микробиологическим факторам					
	Показатель, мг/л		Степень агрессивности	рН среды	Содержание, мг/л			Степень агрессивности
	SO ₄ ⁻² менее	HSO ₃			Свободный CO ₂ , не более	NH ₄ не более	био масса	
Песколовка	1000	450-500	Слабоагрессивная	8-8,5	5	50	100	Не агрессивная
Отстойник	1000	450-500	Слабоагрессивная	7,5-8,5	30	40	500	Не агрессивная
Аэротенк	900	450-500	Слабоагрессивная	7-7,5	30	40	2000	Слабоагрессивная
Метантенк	100	1500-2000	Не агрессивная	6,7-7,3	850	250	До 3000	Среднеагрессивная

Газовый состав получаемого биогаза также повышает коррозионную активность среды. Водородная коррозия стали основана на способности молекул водорода диссоциировать на атомы и в таком виде диффундировать в кристаллическую решетку стали, восстанавливая карбид железа и необратимо взаимодействуя с углеродом в составе стали, лишая ее прочности. Молекулы метана, в свою очередь, слишком крупны для свободной диффузии, они скапливаются в микрополостях и начинающихся трещинах, провоцируя высокое внутрисполостное давление и стимулируя дальнейшее растрескивание.

В мягких сталях, обладающих низкими прочностными свойствами, скопления метана образуются в основном в приповерхностном слое, образуя вздутия – «закипание» стали. При этом следует учитывать, что условия функционирования метанореакторов (повышенная температура и давление, влажность) существенно сокращают инкубационный период между возникновением началом эксплуатации оборудования и проявлением коррозионных изменений. Визуальные результаты газовой коррозии стали приведены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Газовая коррозия стали

Указанная проблема актуальна и для промышленных установок, обладающих полезным объемом метанореактора более 1000м^3 . Изготовление резервуаров такого объема из стали с антикоррозионным покрытием в России редко принимается как наиболее конструктивное решение по причине высокой стоимости материала изготовления и долгого срока окупаемости проекта. Стандартный материал исполнения резервуаров – железобетон, что во многом больше соответствует климатическим и экономическим реалиям России, а также требованиям противопожарной безопасности и взрывозащищенности. Например, в городе Тольятти на Куйбышевском заводе СК эксплуатируются 4 железобетонных метанореактора общей полезной емкостью 8600м^3 [4].

Коррозионным изменениям подвержены как железобетонные, так и стальные конструкции при длительной эксплуатации.

При возведении стальных метанореакторов ранее применялись защитные металлизированные покрытия, основой которых является цинк или

хром, а также лакокрасочные покрытия. Покрытия на основе металлов не обладают упругостью, по этой причине являются крайне неустойчивыми и легко повреждаются при механическом воздействии – например, при кинетическом воздействии твердых элементов, попадающих в реактор с сырьем (небольшие камни, обломки кирпичей, другое). Также неудовлетворительны результаты защиты, обеспечиваемой лакокрасочными покрытиями, - исследованиями доказано, что антикоррозийный механизм в этом случае основан на выполнении роли диффузионного барьера между средой и материалом емкости.

Антикоррозионная обработка стальных и железобетонных метанореакторов нуждается в комплексном подходе. За счет своей пористости, бетон легко проводит влагу, что в результате перепада температур вызывает его механическое разрушение. Кроме этого, работа метантенка в условиях постоянной влажности прежде всего вызывает коррозию железной арматуры в составе конструкции, тогда как для капиллярно-пористой структуры самого бетона характерна слабощелочная реакция влаги, что защищает металл от коррозии. Также важно предупреждение химической коррозии как результата воздействия агрессивных сред: широкая амплитуда колебаний уровня pH, разрушающее действие газовых составляющих (в частности, сероводорода), риск заселения и развития агрессивных к стали и бетону бактериальных организмов.

Выделяют следующие способы защиты от коррозии железобетонных биогазовых реакторов:

а) Для предотвращения коррозионных явлений железобетона используют два уровня изоляции – первичную и вторичную [5]. К методам первичной защиты относят применение бетонов, устойчивых к агрессивным факторам среды, внесение пластифицирующих и стабилизирующих добавок, снижение проницаемости бетона, соблюдение дополнительных расчетных и конструктивных требований при проектировании и выполнении железобетонных конструкций.

б) Вторичную защиту железобетонных конструкций выполняют методом нанесения на поверхность конструкции защитных материалов: биоцидные и уплотняющие пропитки, оклеечные и напыляемые полимерные покрытия. Применение мер первичной и вторичной защиты также повышают защитные свойства бетона по отношению к железной арматуре, что позволяет существенно увеличить ресурс работы резервуаров [6]. При этом если методы первичной защиты необходимо учитывать при возведении новых конструкций, то вторичная защита может быть применена к уже пораженным коррозией конструкциям, если в результате аппаратной оценки принято решение о целесообразности восстановления резервуара. В таком случае технологические процессы в реакторе останавливают, проводят полное его очищение от сторонних компонентов (смеси сырья и биомассы, демонтируемого оборудования и других элементов), проводят биоцидную обработку существующей конструкции, а затем выполняют работу по восстановлению целостности резервуара и нанесению защитного покрытия и/или пропитки.

Для защиты стальных реакторов ранее широко применялись песчано-цементные покрытия, остекление, гальваническое нанесение защитных покрытий. В настоящее время их применение в биогазовых технологиях нецелесообразно в силу существенных недостатков, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика способов антикоррозионной защиты стальных метантенков

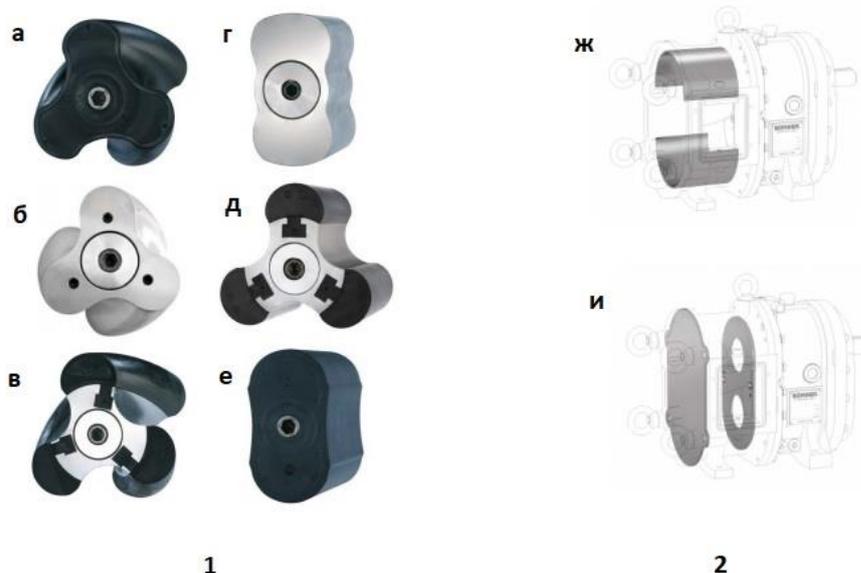
Способ защиты	Преимущества	Недостатки
Цементно-песчаное покрытие	Высокая прочность, стойкость к химической коррозии	Высокая пористость, слабые бактерицидные свойства, склонность к зарастанию
Остекление	Стойкость к коррозии в агрессивных средах, низкие адгезионные свойства	Хрупкость, трудность монтажа и эксплуатации
Гальваническое хромирование	Стойкость к коррозии, твердость	Энергозатратность, опасность условий труда при производстве, громоздкость применяемого оборудования, неустойчивость к деформации
Плакирование	Коррозионная и износостойкость	Высокая стоимость, подверженность коррозии в местах сварных швов
Электродуговая металлизация	Большая толщина покрытия	Низкая ударная прочность, высокая пористость

Отдельного внимания заслуживает решение проблемы коррозионных повреждений насосов перекачки сбраживаемого сырья и другого оборудования, непосредственно соприкасающегося с агрессивными внутренними средами реактора. Наиболее актуальными проблемами являются высокий износ подвижных частей (роторов) и корпусов насосов, охрупчение труб и «обрастание» их внутренней и внешней поверхности продуктами коррозии.

Для защиты насосного оборудования применяются следующие решения:

- а) Применение защитных сменных кожухов корпуса насоса.
- б) Применение полимерных роторов, роторов со сменными наконечниками.
- в) Исключение соприкосновения агрессивной среды с основными частями насоса.

Защитные кожухи внутренней поверхности корпуса насосов и варианты исполнения роторов на примере оборудования немецкой компании Boger представлены на рисунке 4.



1 – типы роторов: а – трехлопастный полимерный ротор со спиральным изгибом 90°, б – трехлопастной ротор из хастеллоя со спиральным изгибом 90°, в – трехлопастной ротор из хастеллоя со сменными полимерными наконечниками со спиральным изгибом 90°, г – двулопастной ротор из хастеллоя, д – трехлопастной ротор из хастеллоя со сменными полимерными наконечниками, е – двулопастной полимерный ротор; 2 – сменная защита корпуса: ж – радиальные защитные пластины, и – аксиальные защитные пластины.

Рисунок 4 – Защита от коррозии насосного оборудования компании Boger

Таким образом, по освещенности темы получения биогаза путем анаэробного сбраживания органических отходов производства и потребления можно сделать вывод об актуальности рассматриваемой в работе проблемы по ряду причин:

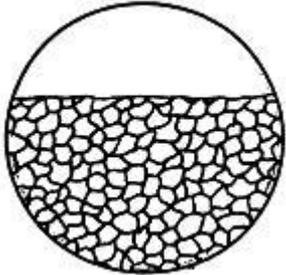
- получение биогаза, по свойствам и составу близкого к природному газу, но более дешевому в производстве;
- получение из отходов многокомпонентных удобрений;
- трансформации биогаза в электрическую или тепловую энергию с высоким КПД.

1.3 Коррозионная агрессивность окружающей среды по отношению к внешней поверхности метантенка и трубопровода

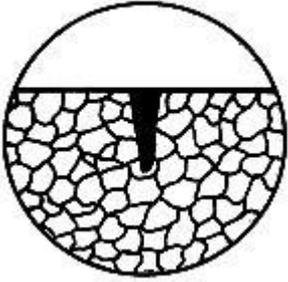
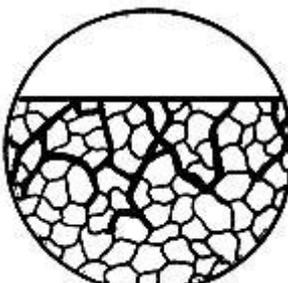
Также внимания заслуживает решение проблемы коррозионных повреждений внешней поверхности трубопроводных магистралей, метантенка и другого оборудования, непосредственно соприкасающегося с агрессивными воздействиями внешних факторов. Наиболее актуальными проблемами являются высокий износ, охрупчение труб и «обрастание» их внешней поверхности продуктами коррозии, а также коррозия от воздействий окружающей среды. Явной проблемой производства биогаза путем анаэробного сбраживания является коррозионное воздействие на внешнюю поверхность реакторов и трубопровода. В силу актуальности развития отрасли целесообразны дальнейшие исследования в поиске наилучшего решения этой проблемы.

Типы поражения металлоконструкции коррозией представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Типы поражения металлоконструкции коррозией

Тип коррозии	Свойство коррозии	Схема
Сплошная	«Равномерно покрывает поверхность материала, постепенно проникая в его толщу. Если ржавчину этого типа зачистить до чистого металла, его поверхность будет шероховатой, но трещин, точек коррозии и язв на нем не будет. Наблюдается это явление чаще всего под гайками, головками болтов, в зазорах и узких щелях, местах скопления влаги и пыли. Сплошная коррозия поражает сталь, алюминий, а также защитные покрытия (цинковые и алюминиевые) под воздействием сред высокой агрессивности» [7].	 <p>Рисунок 5 – Схема сплошной коррозии</p>

Продолжение таблицы 4

Тип коррозии	Свойство коррозии	Схема
Локальная	<p>«Она может проявляться в виде пятен, точек и язв. Первому варианту свойственно неглубокое проникновение в тело металла. Язвенное повреждение материала может спровоцировать возникновение охрупчивания и усталости металла — трещин. Питтинговая (точечная) коррозия характерна для нержавеющей стали и алюминиевых сплавов. Источников такого поражения являются хлоридовозбудители. Диаметр точек не превышает 2 мм, но глубина их значительно больше поперечного размера питтинга» [7].</p>	 <p data-bbox="1102 600 1453 712">Рисунок 6 – Схема локальной (питтинговой) коррозии</p>
Межкристаллитная	<p>«Проявляется наличием множества трещин на обширных площадях конструкций. Локализуется на границах зерен материала, приводя к их выкрашиванию и, как следствие – к образованию язв и поверхностному шелушению» [7].</p>	 <p data-bbox="1078 1205 1477 1272">Рисунок 7 – Схема межкристаллитной коррозии</p>
Расслаивающая	<p>«Распространяется в плоскостях, параллельных направлению горячей деформации металла – экструзии, прокатки или прессования» [7].</p>	 <p data-bbox="1110 1659 1445 1727">Рисунок 8 – Схема расслаивающей коррозии</p>

Для поверхности метантенка и его основных составляющих, непосредственно реагирующие с агрессивной средой наиболее вредоносное

коррозионное несут такие типы коррозии как: биологическая, почвенная, атмосферная.

Основное воздействие атмосферной коррозии приходится на конструкции и оборудования, находящиеся в приземной части атмосферы. Главными факторами влияющие на скорость коррозии атмосферы являются влажность воздуха, природа металла и окружающей его среды. По степени увлажненности этот тип коррозии подразделяют на сухую, протекающую по химическому механизму, и на мокрую, протекающую по электрохимическому механизму соответственно. Атмосферную коррозию металла можно наблюдать на рисунке 9.



Рисунок 9 – Атмосферная коррозия металла

Агрессивное воздействие почвы намного сильнее, чем атмосферное. Почвенная коррозия является основной причиной повреждения всех видов трубопроводов, непосредственно проходящих под землёй, а также конструкций, которые эксплуатируются в почвенном покрове. Основной фактор на скорость коррозии от почвы зависит от влажности грунта, в которой находится аппарат. Влажность грунта вызывает электрохимическую коррозию металла, что приводит к огромным убыткам.



Рисунок 10 – Почвенная коррозия труб

«Биокоррозия (биологическая коррозия) – тип коррозионного разрушения в условиях воздействия микроорганизмов. Продукты жизнедеятельности различных микроорганизмов, которые присутствуют в воде, грунте, интенсифицируют процесс коррозии. В результате протекания биокоррозии на поверхности металла появляются небольшие углубления (блестящие либо шероховатые), раковины, неровности, которые могут быть заполнены продуктами коррозии (рисунок 11). Биокоррозия в большинстве случаев носит язвенный либо питтинговый характер. Чаще всего биокоррозия является локальным разрушением» [8].



Рисунок 11 – Биокоррозионные повреждения внутренней поверхности труб

«Чаще всего протекает бактериальная биокоррозия. Она же и наиболее разрушительна. Данный вид встречается в воде, почве, топливе при наличии бактерий. Бактерии очень быстро размножаются и легко приспосабливаются к всевозможным условиям окружающей среды. Бактериальная биокоррозия может протекать при рН среды от 1 до 10,5 и температуре (чаще всего) 6 – 40 °С при наличии различных органических и неорганических веществ, содержащих кислород, углерод, водород, железо, азот, калий, серу и т.д» [9].

«На рисунке 12 приведена гистограмма распределения повреждений по маркам сталей относительно общего количества исследованных случаев. На качественном уровне рисунок хорошо отражает реальное состояние оборудования. Так, наибольшую склонность к низкотемпературному слоистому водородному расслоению проявляют металлоконструкции, изготовленные из сталей марок 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей марок сталь 20, сталь СтЗсп». [10].

«На практике выявлено значительное количество случаев, когда изготовленное оборудование из сталей марок 09Г2С и 16ГС, без уточнения требований к их категориям, подвергалось отбраковке уже через 2-4 года эксплуатации» [10].

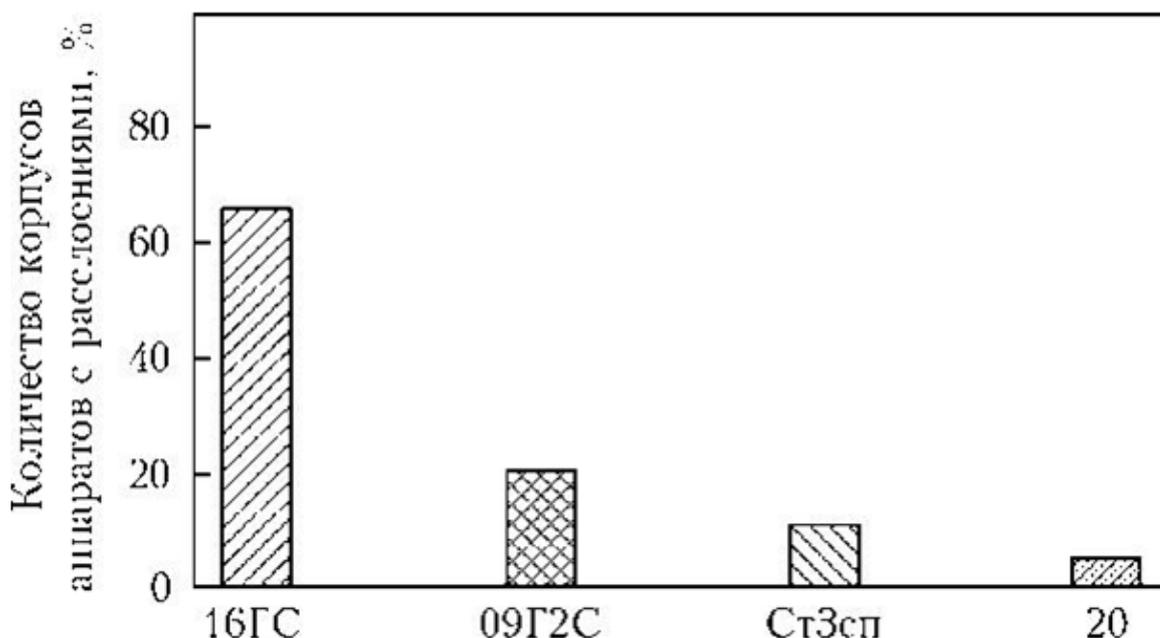


Рисунок 12 – Доля корпусов аппаратов с обнаруженными в них коррозионными расслоениями

Выводы к разделу 1:

В данном разделе был рассмотрен подробный литературный обзор, который представляет собой анализ использованной литературы. С его помощью показана значимость проблемы коррозионного воздействия на металлические поверхности.

Многолетний опыт исследования газового оборудования, эксплуатирующегося в условиях агрессивной среды, широкого диапазона температуры, высокого содержания водорода и сероводорода и др., позволил зафиксировать огромное количество фиксаций слоисто водородных повреждений оборудования, емкостей, корпусов аппаратов, которые изготовлены из низколегированных сталей.

2 Исследование возможности применения антикоррозионного покрытия как способа повышения ресурса работы оборудования анаэробного сбраживания

2.1 Основные методы повышения коррозионной стойкости оборудования

2.1.1 Полимерные покрытия

Наибольшее распространение получило применение полимерных покрытий для защиты стальных реакторов от коррозии. При обработке стальных резервуаров используют ингибиторы коррозии, добавляемые в полимерные лакокрасочные покрытия [11]. Такие добавки позволяют защитить сталь даже при нарушении целостности покрытия за счет взаимодействия ингибиторов с энергетически неоднородными участками покрытия (трещинами, мелкими сколами). Молекулы ингибиторов адсорбируются на металлической поверхности за счет сил физического и химического взаимодействия и блокируют анодные зоны, препятствуя выходу ионов металла в раствор, а также катодные, нейтрализуя электроны ионами-деполяризаторами. Это возможно благодаря поверхностно-активным свойствам ингибиторов, которые позволяют им диффундировать и покрытия и адсорбироваться на металлической поверхности резервуара. В качестве неорганических ингибиторов, эффективных в нейтральных средах, применяют соли: хроматы, фосфаты, молибдаты, вольфраматы. Среди органических ингибиторов хорошо зарекомендовали себя марки «ВНХ 5», «М 2», «ТАЛ 2», «СЖК», «ВНХ 101», «ВНХЛ 49», а также бензотриазол. По исследованиям последних лет доказана эффективность применения смесей неорганических и органических ингибиторов, например, смеси хромата стронция с органическими «ВНХ 5», «М 2» или «СЖК».

2.1.2 Газопламенное напыление (ГПН)

«Данный способ предполагает нагрев порошкообразного, пруткового (проволочного) или шнурового материала (рисунки 13-14) в пламени

газового факела и доставку мельчайших частиц на поверхность обрабатываемого изделия потоком дымовых газов. В качестве источника тепловой энергии выступает пламя, образующееся в результате горения смеси кислород - горючий газ (ацетилен или пропан). Газопламенный метод отличается относительной простотой применяемого оборудования. Вместе с тем для осуществления технологического процесса необходима непрерывная подача кислорода и топлива. Температура наносимого материала, проходящего через факел горелки, близка к температуре плавления» [12].

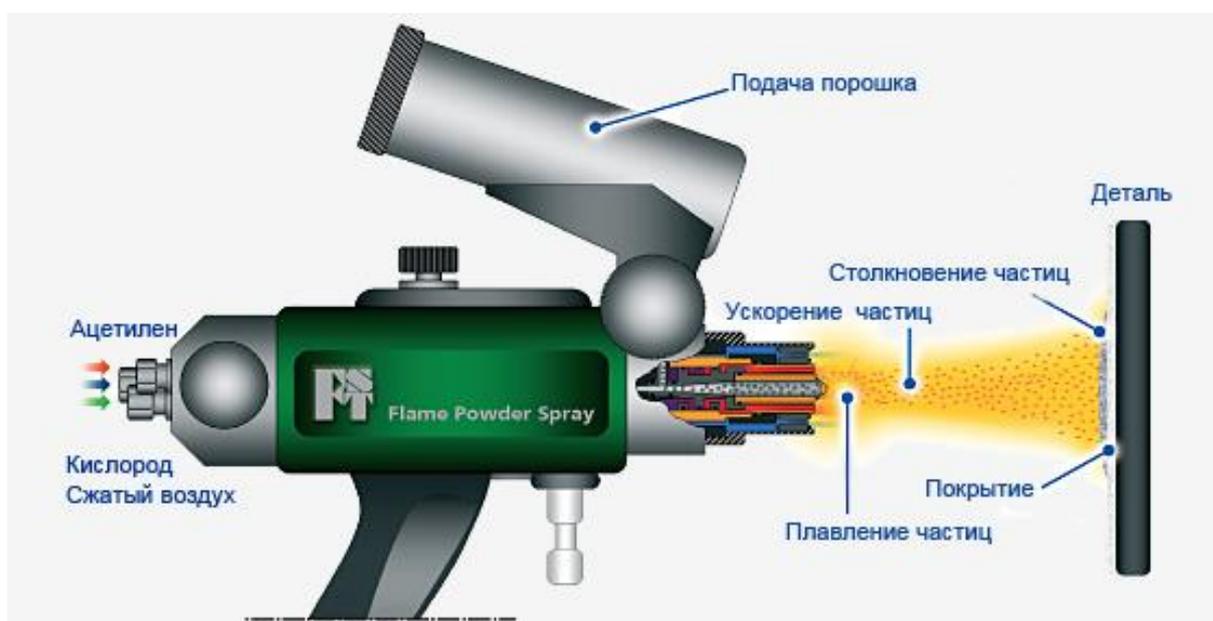


Рисунок 13 – Схема порошкового газопламенного напыления



Рисунок 14 – Схема проволочного газопламенного напыления

Соприкосновение нагретых частиц между собой приводит к соединению с подложкой, которое образует покрытие, равномерное и плотное.

Для этого метода покрытия используются такие материалы как: оксиды (например, оксид алюминия), различные металлические сплавы (алюминий, бронза, хром), и полимерные материалы.

«Описываемый метод обладает следующими основными преимуществами:

- высокой производительности;
- высокая локальность нанесения покрытий;
- незначительное влияние на напыляемую основу;
- неограниченность в габаритах обрабатываемого изделия;
- широкий спектр сочетания материалов покрытий и подложки;
- невысокий уровень шума и излучений;
- простота и мобильность оборудования;
- широкий диапазон возможных толщин покрытий;
- простота технологии.

Недостатками метода являются:

- невысокий коэффициент использования тепловой энергии дымовых газов;
- ограничения по применению некоторых легкоплавких материалов.

Рассматриваемый способ позволяет технологически просто получать прочное покрытие с высокими адгезионными свойствами, при отсутствии смешивания с материалом основы. Структурно слой покрытия состоит из твердого раствора и избыточных фаз материалов напыления» [12].

2.1.3 Гальванические покрытия

Гальванические покрытия, получаемые путем ионоосаждения, применимы для небольших изделий, не требующих организации громоздких комплексов обработки. Выделяют следующие методы:

- железнение;
- кадмирование;
- никелирование;
- цинкование (не является стойким в агрессивных средах);
- осаждение благородных металлов (не рассматривается в силу стоимости покрытия);
- электроосаждение сплавов и комбинированных покрытий (востребованы для придания термо- и износостойкости);

«Основным недостатком гальванического осаждения является:

- громоздкость применяемого оборудования, энергозатратность и тщательное соблюдение техники безопасности, и условий охраны труда;
- недостаточная адгезионная прочность к подложке;
- растрескивание при деформации обрабатываемого изделия.

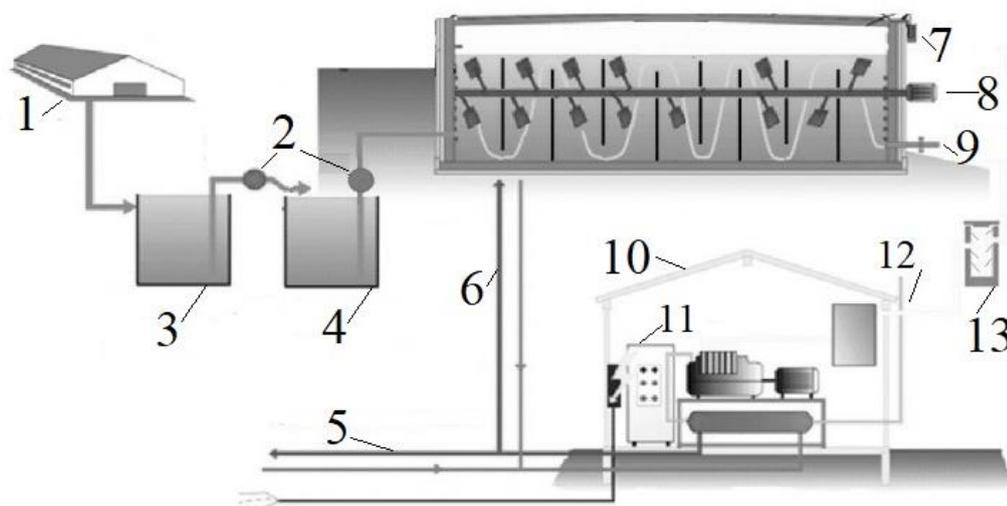
Увеличение толщин гальванических покрытий связано с значительным усложнением технологического процесса, что отрицательно сказывается на экономичности метода.

Существенный недостаток данного вида покрытий заключается в его малой износостойкости, защитный слой теряет протекторные свойства при, даже незначительном механическом воздействии на него» [13].

2.2 Расчетное обоснование применения покрытия

Для определения целесообразности применения антикоррозионного покрытия рассмотрим эксплуатационные характеристики биогазовой установки и их изменение в отсутствие антикоррозионных покрытий сделанная из дорогой коррозионностойкой стали. Основным показателем работы установки является тепловой баланс метантенка.

В качестве образца возьмем биогазовую установку с горизонтальным метантенком, представленную на рисунке 15 [14].



1 – ферма, 2- насосные станции, 3 – емкость сбора и гомогенизации жидкого сырья, 4 - подогреватель-выдерживатель, 5 – тепло на технологические нужды, 6 – подогрев реактора, 7 – выход биогаза, 8 – перемешивающее устройство, 9 – отвод отработанной массы, 10 – когенерационный блок, 11 – блок автоматики, 12 – отходящие газы, 13 – конденсатор-отводчик.

Рисунок 15 – Состав биогазовой установки с горизонтальным метантенком

Горизонтальный метантенк представляет собой цилиндрическую емкость с двумя торцевыми уплощенными крышками. Синусоидальное перемещение сбраживаемой сырьевой массы обеспечивается благодаря организации внутреннего пространства вертикальными перегородками и вала с перемешивающими лопатками. Для расчета принят стальной метантенк с длиной цилиндрической части 6,2 м, радиусом 1,81 м, рабочий объем которого составляет 70 % внутреннего пространства реактора. Толщина стенки реактора составляет 28 мм, материал исполнения – коррозионностойкая сталь марки 06×Н28МДТ (ЭИ943), изготовленная согласно ГОСТ 5632-72 [15], теплопроводность 13 Вт/(м²·С). В качестве сырья для сбраживания принимаем навоз крупного рогатого скота, температура термофильного сбраживания 70 °С. Для наглядности рассмотрим эксплуатацию установки в зимний период с температурой внешней среды минус 30°С.

Энергия на поддержание теплового баланса метантенка рассчитывается по формуле (6):

$$Q = Q_{ок} + Q_{уг} + Q_{исп} + Q_{дсд}, \quad (6)$$

где $Q_{ок}$ – теплота, теряемая через ограждающие конструкции, кДж;

$Q_{уг}$ – теплота, теряемая с уходящими газами, кДж;

$Q_{исп}$ – теплота, теряемая на испарение жидкости, кДж;

$Q_{дсд}$ – теплота, необходимая для догрева новой суточной дозы субстрата, кДж.

Через стенки реактора проходит тепловой поток, в результате которого теряется часть тепла; потери можно вычислить по формуле (7):

$$Q_{ок} = F \cdot k \cdot (t_{вн} - t_{н}), \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопередачи через стенку реактора, Вт/(м²·°С);

F – средняя площадь наружной поверхности метантенка, составляет $91,1 \text{ м}^2$;

$t_{\text{вн}}$ – температура брожения субстрата, $70 \text{ }^\circ\text{C}$;

$t_{\text{н}}$ – расчетная температура окружающей среды, минус $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи рассчитаем по формуле (8):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней среды к внутренней поверхности стенки, принимаем равным $1,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

δ – толщина слоя стенки, $0,028 \text{ м}$;

λ – теплопроводность слоя стенки, $13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней стенки в внешней среде, с учетом скорости ветра принимаем $52,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Подставляем значения в формулу (8):

$$k = \frac{1}{0,77 + 0,002 + 0,02} = 1,26$$

Подставляем найденное значение в формулу (7), получаем:

$$Q_{ok} = 91,1 \cdot 1,26 \cdot (70 - (-30)) = 11478,6 \text{ Вт}$$

При конвертации единиц измерения получаем потери тепла через стенки реактора $991751,04 \text{ кДж}$ в сутки.

Теплоту, теряемую с уходящими газами, определяем по формуле (9):

$$Q_{y2} = c_p \cdot m \cdot t, \quad (9)$$

где c_p – теплоемкость газа при температуре брожения, кДж/(кг·°С);

m – масса газа, кг;

t – температура брожения, 70°С.

Принимаем состав газовой смеси как 76 % метана, 20 % углекислый газ, 4 % примеси (водород, сероводород), получаем значение c_p равное 2,126 кДж/(кг·°С). При выходе газа равном 60 м³ с 1 тонны сырья получаем суточную массу газа 465,607 кг. Подставляем значения в формулу (9):

$$Q_{y2} = 2,126 \cdot 465,607 \cdot 70 = 69291,63 \text{ кДж}$$

Теплоту, теряемую на испарение жидкости, рассчитываем по формуле (10):

$$Q_{исп} = 2500 \cdot q_{ж}, \quad (10)$$

где 2500 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

$q_{ж}$ – количество испарившейся жидкости.

При условии, что на каждый 1 м³ выделившегося газа испаряется 1,08 воды, а сбрасываемое сырье состоит из воды не менее чем на 90 %, получаем:

$$Q_{исп} = 2500 \cdot 534,6 = 1336500 \text{ кДж}$$

Теплоту, необходимую для догрева подаваемого на очистку сырья, рассчитываем по формуле (11):

$$Q_{дсд} = m_{сут.загр} \cdot c_{H2O} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где $m_{сут.загр}$ – масса суточной загрузки сырья в метантенк, кг;

c_{H2O} – теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/кг;

Δt – разность температур исходного и нагретого сырья, °С.

С учетом скорости анаэробного сбраживания суточную загрузку сырья в метантенк принимаем 7500 кг. В зимнее время принимаем исходную температуру сырья равной 5 °С, следовательно, Δt составит 65 °С. Подставляем значения в формулу (11) и получаем:

$$Q_{\text{дсд}} = 7500 \cdot 4,19 \cdot 65 = 2042625 \text{ кДж}$$

Суммируем все полученные значения и получаем общие тепловые потери при работе метантенка в зимнее время за одни сутки:

$$Q = 991751,04 + 69291,63 + 1336500 + 2042625 = 4440167,67 \text{ кДж}$$

Таким образом, стабильно работающий горизонтальный метантенк в зимнее время несет потери тепла равные 4440 МДж. Следовательно, простое использование коррозионностойкой стали в изготовлении метантенка малоэффективно и экономически не выгодно.

Значимыми параметрами для расчета являются:

$\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней среды к внутренней поверхности стенки, принимаем равным 1,3 Вт/(м²·°С);

δ – толщина слоя стенки, 0,028 м;

λ – теплопроводность слоя стенки, 13 Вт/(м·°С);

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней стенки в внешней среде, с учетом скорости ветра принимаем 52,4 Вт/(м²·°С).

Эти параметры напрямую зависят от состояния резервуара реактора, его целостности и физических свойств. Коэффициент теплопередачи $\alpha_{\text{вн}}$ может быть скорректирован за счет нанесения слоя антикоррозийного покрытия на внутреннюю поверхность реактора и учета его свойств. При расчете теплового баланса также может быть изменен и коэффициент $\alpha_{\text{н}}$

путем покрытия наружной поверхности реактора антикоррозионным покрытием с дополнительными теплоизоляционными свойствами.

Значения параметров δ и λ зависят от качества материала (в данном случае – сталь) и его количественных характеристик (толщина стенки). Коррозионные явления со временем истончают металлические конструкции и делают их более рыхлыми, что показано на рисунке 16.



Рисунок 16 – Стальной резервуар, пораженный коррозией

Соответственно, толщина стенки существенно уменьшается, а теплопроводность увеличивается. Суммарно это дает увеличение потерь тепла и снижение КПД реактора. Кроме этого, необходимо обязательно учесть, что при образовании трещин и проржавленных дыр дополнительно из реактора будет уходить и вырабатываемый биогаз, что увеличит теплотери по показателю $Q_{уг}$ и снизит полезное количество биогаза, вырабатываемого реактором.

2.3 Отчет о патентных исследованиях

В ходе подготовки работы проведено исследование патентных разработок существующих реакторов анаэробного сбраживания, а также применяемых в отрасли антикоррозионных покрытий.

Основной материал исполнения горизонтальных реакторов – нержавеющая и углеродистая сталь, при этом в силу экономических причин и свойств материала нержавеющая сталь применяется для компактных реакторов, менее стойкие к коррозии виды – для реакторов большей производительности. В связи с этим, вопрос увеличения срока службы метантенков путем нанесения антикоррозионных покрытий наиболее актуален. При выполнении патентного поиска по разработкам антикоррозионных покрытий учитывалась необходимость защиты как внутренней, так и внешней поверхности реактора от агрессивных воздействий среды и температурных изменений.

2.3.1 Анализ источников патентной информации

Проведен поиск патентной информации, где описаны применяемые антикоррозионные покрытия и рассматриваемый метантенк. Анализ патентов приведен в таблице 5 и 6.

Таблица 5 – Анализ источников патентной информации по теме аппараты анаэробного сбраживания

Автор патента	Дата начала действия патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
Дианов Л. В., Маслов М. М.	10.08.2006	«Изобретение относится к устройствам для анаэробного сбраживания жидкого материала из органических отходов сельскохозяйственного производства, в том числе навоза. Метантенк для биогазовых установок включает горизонтальную цилиндрическую емкость, разделенную центральной неподвижной перегородкой на камеры первой и второй половины брожения, общую для камер мешалку, электромагнитный обогреватель и реверсивный насос. Емкость имеет герметичную перегородку с задвижкой, которая обеспечивает переливание части материала из первой камеры в свободную вторую без затрат энергии. Реверсивная, самоочищающаяся мешалка выполнена из вала, к которому на спицах-лопатках крепится навивка винтовой шнековой полосы» [16].	«Технический результат: непрерывность производства биогаза, полнота сбраживания материала, снижение энергоемкости, эксплуатационных затрат, стоимости изготовления метантенка с упрощением конструкции» [16].

Таблица 6 – Анализ источников патентной информации по теме антикоррозионные покрытия

Автор патента	Дата начала действия патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
Буков Н. Н., Горохов Р. В., Левашов А. С., Мнацаканова Е. Юа.	23.07.2008	«Изобретение относится к области получения полимерных покрытий, а именно к получению полимерного покрытия на основе эпоксидной композиции. Полимерная композиция в соответствии с изобретением относится к двухупаковочным композициям. Композиция состоит из компонента А, содержащего эпоксидную диановую смолу, эпоксидную алифатическую смолу и	«Технической задачей заявленного изобретения является снижение токсичности состава, улучшение его барьерных защитных свойств при нанесении покрытий, увеличение абразивоустойчивости покрытия, снижение стоимости, за счет увеличения процентного содержания более дешевого неорганического наполнителя (базальтовой чешуи), чем связующее (эпоксидная смола), и расширение его функционального назначения» [17].

Продолжение таблицы 6

Автор патента	Дата начала действия патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
		<p>базальтовую чешую с толщиной пластинок 1-2 мкм с размером фракции 0,001-0,02 мм, и компонента Б, содержащего смесь отвердителя - ароматического олигоамида и базальтовой чешуи. Полученное покрытие обеспечивает высокие барьерные свойства, предотвращает контакт агрессивной среды с защищаемой поверхностью. Кроме того, получаемое покрытие обладает высокой стойкостью к истиранию, нетоксично и обладает повышенной жизнеспособностью» [17].</p>	
<p>Гедзь А. Д., Коберниченко А. Б., Ухалин А. С., Ефремов В. В., Шульчевский Ю. Г.</p>	<p>21.04.2003</p>	<p>«Изобретение относится к области металлургии, в частности к способу газопламенного напыления металлических порошковых материалов, и может найти применение при изготовлении изделий с покрытиями в различных отраслях машино- и приборостроения. Способ включает введение в пламя, образованное при сгорании ацетилена и кислорода, струи, состоящей из транспортирующего газа и напыляемого порошка. Струю защищают инертным газом, который подают на расстоянии от среза сопла газопламенной горелки по периферии напыляемого потока с определенным углом наклона образующей потока защитного газа к оси струи» [18].</p>	<p>«Технический результат направлен на повышение прочности сцепления металлических покрытий с основой. Технический результат достигается тем, что в предлагаемом способе газопламенного напыления порошковых материалов, включающем введение в пламя, образованное при сгорании ацетилена и кислорода, струи, состоящей из транспортирующего газа и напыляемого порошка, струю защищают инертным газом» [18].</p>

2.4 Внутреннее антикоррозийное покрытие метантенка

При выполнении патентного поиска по решению антикоррозионной защиты внутренней поверхности метантенка дополнительно поставлена цель снижения абразивной истираемости поверхности, при этом одним из главных условий является нетоксичность покрытия к функционирующим в реакторе организмам.

Одним из наиболее соответствующих вариантов является полимерная композиция для защитного антикоррозионного покрытия барьерного типа (патент 2394058), относящаяся к двухупаковочным композициям. Она состоит из компонента А, в состав которого входят эпоксидная диановая смола, эпоксидная алифатическая смола и базальтовая чешуя с толщиной пластинок 1-2 мкм и размером фракции 0,001-0,02 мм, и компонента Б, содержащего смесь отвердителя - ароматического олигоамида и базальтовой чешуи. Компонентный состав композиции приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Компонентный состав композиции (патент 2394058)

Компонент А					
№ п/п	Наименование компонентов	Массовая доля, %			
		1	2	3	4
1	Эпоксидно-диановая смола ЭД-20	45	46	50	55
2	Алифатическая эпоксидная смола ДЭГ-1	14	12	10	9
3	Базальтовая чешуя АБЧ-100	41	42	40	38
Итого, %		100	100	100	100
Компонент Б					
№ п/п	Наименование компонентов	Массовая доля, %			
		1	2	3	
1	Этал-45М	57	60	63	
2	Базальтовая чешуя АБЧ-100	43	40	37	
Итого, %		100	100	100	

Основные характеристики компонентов А и Б представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Характеристика компонентов А и Б двухупаковочной полимерной композиции

Наименование показателя	Норма для компонента А	Норма для компонента Б	Метод испытания
Внешний вид	Темно-коричневая вязкая суспензия	Темно-коричневая вязкая суспензия	353-105-1207-2002ТУ
Массовая доля летучих веществ, %	Не более 2	2	ГОСТ 17537
Динамическая вязкость, спз при $(25 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$	6200-6600	2000-2400	ГОСТ 25276-82
Динамическая вязкость, спз при $(35 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$	3400-3800	850-950	ГОСТ 25276-82
Динамическая вязкость, спз при $(50 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$	750-850	400-500	ГОСТ 25276-82

Получаемое покрытие выполняет барьерную функцию предотвращая контакт защищаемой поверхности с агрессивной средой, обладает высокой стойкостью к истиранию и повышенной жизнеспособностью. Общие свойства покрытия представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Свойства двухупаковочной композиции

Наименование свойств покрытия	Показатель	Условия нанесения наносится при температуре от -5 до $+50^{\circ}\text{C}$,	Возможно нанесение на влажные поверхности
Внешний вид покрытия	Гладкое покрытие от темно-коричневого до черного цвета	Гидроабразивная устойчивость	Высокая
Толщина защитного слоя, мм	1-2	Влагопоглощение, %	0,51
Плотность, г/см ³	1,3	Химическая стойкость покрытия ((+) - покрытие стойко, (\pm) - покрытие стойко в течение короткого времени, (-) – покрытие нестойко)	
Расход, кг/м ² (при толщине покрытия 1 мм)	1,3	Вода, этиловый спирт (50%)	+
		Бутиловый спирт, глицерин	+
Термостойкость, $^{\circ}\text{C}$	180	Бензин	+

Продолжение таблицы 9

Наименование свойств покрытия	Показатель	Условия нанесения наносится при температуре от -5 до +50 ⁰ С,	Возможно нанесение на влажные поверхности
Содержание органических растворителей	Не содержит	Муравьиная, молочная и уксусная кислота (20%)	+
Адгезионная прочность: -методом решетчатых надрезов (балл) -методов отрыва (МПа) (сталь 3)	1	Формальдегид (37%)	+
	20	Концентрированные растворы щелочей	+
Массовая доля нелетучих веществ, %	98-99	Раствор каустической соды (30%)	+
Жизнеспособность, мин: -20 ⁰ С -45 ⁰ С	40-50	Концентрированные растворы щелочей	+
	20-30	Фосфорная кислота (10%)	+
Время отверждения (ч): -до степени 2 -до степени 3	4	Серная кислота (20%)	+
	5	Дизельное топливо, моторное масло	+
Время полного отверждения (20 ⁰ С),ч	24	Хромовая кислота, борная кислота (10%)	+
		Голуол, ксилол, бензол	±
Вязкость, спз: -25 ⁰ С -45 ⁰ С	3500-4500 700-900	Ацетон, бутилацетат, четыреххлористый углерод	±

Что особенно важно в нашем случае, покрытие абсолютно нетоксично. Дополнительно стоит отметить, что покрытие применимо для различных поверхностей: конструкции металлические и бетонные, трубопроводы, металлические узлы и агрегаты, а также в области архитектуры и интерьерного дизайна.

Получение полимерной композиции происходит следующим способом:

- а) Для получения компонента А смешивают эпоксидную диановую смолу ЭД-20 и алифатическую эпоксидную смолу ДЭГ-1, после чего

в смесь эпоксидных смол диспергируют андезитовую базальтовую чешую с размерами фракции 0,001-0,02 мм².

- б) Компонент Б получают смешением отвердителя ЭТАЛ-45М с андезитовой базальтовой чешуей.

Полученные составы хранятся отдельно друг от друга и наносятся на защищаемую поверхность ручным или механизированным способом. При ручном способе нанесения компоненты предварительно смешивают в соотношении от 2:03 до 2:1,5. При механизированном способе нанесения предварительное смешение не нужно. В зависимости от вида и формы поверхности можно регулировать вязкость компонентов с помощью температуры, однако, не перегревая выше 60 °С.

Более поздней разработкой является система антикоррозионного лакокрасочного покрытия (патент RU 2562280 С1), основное предназначение которого – антикоррозионная защита подземных металлических конструкций. Система состоит из связующего, наполнителя и растворителя; нанесение предлагается в два слоя – грунтовочного и покрывного. В состав грунтовочного слоя входят связующее (смесь кремнийорганической эмали и асмольного лака), наполнитель (высокодисперсный цинк) и растворитель (сольвент нефтяной). Соотношение компонентов следующее:

- 100 массовых частей кремнийорганическая эмаль КО-198;
- 20-25 массовых частей асмольный лак;
- 8-12 массовых частей высокодисперсный цинк;
- Растворитель до рабочей вязкости.

Грунтовочный слой обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытия с металлом, он наилучшим образом защищает металл от коррозии.

Приготовление состава возможно по двум примерам, от которых зависят свойства наносимого покрытия.

При приготовлении по примеру 1 сначала готовят грунтовочный слой со следующим составом:

- 100 массовых частей кремнийорганическая эмаль КО-198;

- 20 массовых частей асмольный лак;
- 8 массовых частей высокодисперсный цинк;
- 10 массовых частей растворитель.

Для первого слоя покрытия в емкости при комнатной температуре смешивают 3 л кремнийорганической эмали КО-198 (ТУ 6-02-841-74) и асмольного лака (ТУ 2311-020-16802026-2000), перемешивают в течение 15 минут, затем добавляют высокодисперсный цинк и перемешивают еще 10 минут до однородности. Растворитель - сольвент нефтяной (ГОСТ 10214-78) необходимо добавлять непосредственно перед применением грунтовки, которая наносится на защищаемую поверхность кистью. Грунтовочный слой просушивают «до отлипа».

После готовности грунтовочного слоя на него наносят покрывной слой следующего состава:

- 100 массовых частей кремнийорганическая эмаль КО-198;
- 6 массовых частей смеси графита и дисульфида молибдена (4:1);
- 2 массовых части нафтената кобальта;
- 10 массовых частей растворитель.

Для приготовления состава для покрывного слоя в смеситель емкостью 3 л загружают кремний органическую эмаль КО-198 (ТУ 6-02-841-74), не прекращая перемешивания, добавляют смесь графита марки ГЛС1 (ГОСТ 5420-74) и дисульфида молибдена марки ДМИ-7 (ТУ 48-19-144-90), перемешивают 20 минут, после чего добавляют остальные компоненты. Состав равномерно наносят на грунтовочный слой. Время высыхания комбинированного покрытия обоих слоев до степени 3 при 20 °С 25 минут.

При приготовлении по примеру 2 грунтовочный слой содержит:

- 100 массовых частей кремнийорганическая эмаль КО-198;
- 25 массовых частей асмольный лак;
- 12 массовых частей высокодисперсный цинк;
- 15 массовых частей растворитель.

На грунтовочный слой наносится покрывной, имеющий состав:

- 100 массовых частей кремнийорганическая эмаль КО-198;
- 8 массовых частей смеси графита и дисульфида молибдена (4:1);
- 2,5 массовых части нафтената кобальта;
- 15 массовых частей растворитель.

Время высыхания до степени 3 при 20 °С у покрытия, приготовленного по примеру 2, аналогично примеру 1 – 25 минут. В таблице 10 приведены сравнительные результаты испытаний свойств предлагаемых покрытий, приготовленных по разным примерам.

Таблица 10 – Сравнительные результаты испытаний свойств предлагаемых покрытий

Результаты испытаний покрытий			
Показатели	Покрытие, наносимое по прототипу	Покрытие, наносимое по предлагаемому изобретению	
		Пример №1	Пример №2
Толщина покрытия, мкм	30-180	100	120
Водопоглощаемость покрытия, % после экспозиции при 20 ⁰ С	1,62-1,88	1,46	1,58
Предел прочности лакокрасочной системы при растяжении, МПа	10,5-19,2	12,5	15,8
Относительное удлинение лакокрасочной пленки при разрыве, %	32-42	28	34
Интенсивность износа, мм/(кг · см ²)	0,82-0,98	0,65	0,72

2.4.1 Экономическая целесообразность применения антикоррозионного покрытия

В параграфе 2.1 - 2.2 данной работы приводятся рабочие параметры метанореактора, напрямую зависящие от степени поражения его коррозией. Тепловые потери и снижение КПД по соотношению получаемого газа к количеству сброженного сырья являются не единственными следствиями коррозионного воздействия.

Экономический учет потерь необходимо проводить, опираясь на фактические данные работы конкретного реактора, специфики сбраживаемого сырья, климатических особенностей региона. Однако некоторые параметры возможно учесть, и они могут быть рассмотрены на примере модели горизонтального метантенка, описанного в п.1.7:

1) Износ запирающей арматуры

Задвижки на сырьевых и газовой магистралях, а также на окне 4 чрезвычайно подвержены влиянию агрессивных факторов внешней и внутренней среды. При этом режим их работы подразумевает существенные нагрузки, требующие исполнения из высокопрочных материалов. В таблице 11 указаны сравнительные стоимости задвижек штоковых производства компании «Dendor» для трубопроводов диаметром 200 мм.

Таблица 11 – Сравнительная стоимость запорной арматуры при различных материалах исполнения

Материалы исполнения	Стоимость в рублях	Примерный срок службы
корпус - сталь, диск - нержавеющая сталь	19193,00	Более 9 лет
корпус - чугун, диск - чугун	8966,00	1,1-1,2 года до появления коррозии, 3-4 года до замены
корпус - чугун, диск - нержавеющая сталь	14004,00	1,5-2,5 лет до появления коррозии, 5-7 лет до замены

При анализе цен заметно, что выбор запорной арматуры из материалов, не подверженных коррозии, оправдан в обозримой перспективе.

2) Износ газовых и сырьевых магистралей

Согласно приказу Ростехнадзора от 21.11.2013 года № 558 [19], сроки службы газовых трубопроводов составляет не более 40 лет для стальных труб и не более 50 лет для полиэтиленовых труб. С учетом снижения внутреннего диаметра в результате газовой и химической коррозии срок разумной эксплуатации стальных труб и труб из коррозионно неустойчивых марок стали составляет не более 12-17 лет, после чего требуется их полная замена.

3) Износ лопастей, вала и шнековой ленты мешалок

Износ движущих частей перемешивающей конструкции ведет к обламыванию лопаток, обрыву шнековой ленты, вследствие чего снижается качество перемешивания сбразиваемой массы. Нарушение технологического цикла ведет к снижению выработки газа, а также к опасности образования газовых лакун, при перегреве становящихся взрывоопасными.

4) Перерасход топлива и дополнительный износ мотора-редуктора, излишнее использование подогрева

При постепенном смещении теплового баланса расход топлива или электроэнергии на перемешивание сырья и поддержания необходимой температуры технологического процесса возрастает. Для примера взят тариф на электроэнергию для юридических лиц по одноставочному тарифу в г. Самара. В 2019 году максимальная ставка составила 3,72037 руб/кВт·ч, что при увеличении энергопотребления на 5 кВт в сутки составит:

- 18,6 рублей в день;
- 130,21 рублей в неделю;
- 542,85 рублей в месяц;
- 7291,93 рубля в год.

При пересчете на реальные увеличения потребления электричества вполне возможна ситуация, что при значительном смещении теплового баланса эксплуатация биогазовой установки станет не только экономически невыгодной, но и убыточной.

Приведенные данные показывают, что для максимальной эффективности процесса анаэробного сбразивания требуется соблюдение двух принципов:

- 1) Смещение теплового баланса таким образом, чтобы максимально снизить теплотери при эксплуатации установки;
- 2) Максимальное увеличение ресурса работы оборудования с целью снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

Существенное влияние на эффективность и долговечность функционирования установки анаэробного сбраживания оказывает явление коррозии, повреждающее корпус реактора и применяемое оборудование. Выполнение указанных условий возможно как путем изначального применения современного оборудования, изготовленного из коррозионностойких материалов, так и нанесением на существующее оборудование специальных антикоррозийных покрытий. Исследование патентных данных выявило наличие покрытий, не только защищающих от коррозии, но и улучшающих тепловой баланс установки.

2.5 Внешнее антикоррозийное покрытие метантенка

Наиболее выгодный метод нанесения покрытий для биогазовой промышленности является металлизационный. Детали и узлы оборудования метантенка подвергаются сильному механическому и коррозионному воздействию. Газопламенный метод успешно используется для защиты поверхности протяженных трубопроводов, оборудования биогазовой промышленности а также всех других деталей, он обладает всеми требуемыми защитными свойствами от коррозии.

2.5.1 Оптимизация химического состава и свойств газопламенных покрытий

«Для осуществления выбранного в работе метода и основы материалов ГПН, согласно ГОСТ 28377-89 «Порошки для газотермического напыления и наплавки» и данных исследований ЦВТ ФГБОУ ТГУ был проведен подбор наиболее оптимальных по физико-химическим, технологическим и экономическим свойствам марок порошков ПВ-Н85Ю15, ПР-НХ17СР4, ПР-ЦнЮ16 (ПГ-АН27), а также порошки для особо высокотвердых покрытий – WC/Co 88/12 и Плакарт-0.05-Н» [20].

Химический состав и назначение данных марок порошков приведены в таблицах 12, 13.

Таблица 12 – Химический состав порошков для напыления

№ п/п	Марка порошка	Химический состав, %									
		Ni	Fe	C	Cr	Si	Al	B	Zn	WC	Co
1	ПВ-Н85Ю15	основа	0,2	0,07	-	-	12 – 15	-	0,08	-	-
2	ПР-НХ17СР4	основа	до 5	0,8 – 1,2	16 – 18	3,8 – 4,5	-	3,1 – 4,0	-	-	-
3	ПР-ЦнЮ16 (ПГ-АН27)	-	0,1	-	-	-	16	-	основа	-	-
4	WC/Co 88/12	-	-	-	-	-	-	-	-	88	12
5	Плакарт-0.05-Н	основа	-	-	25	-	-	-	-	-	-

Таблица 13 – Назначение и свойства порошков для напыления

№ п/п	Марка порошка	Назначение	Свойства
1	ПВ-Н85Ю15	«Газотермические жаростойкие, стойкие в воде и щелочи покрытия, подслои для покрытий из оксидов и карбидов» [20].	«- температура плавления 1400 °С - жаростойкость покрытий при нагреве на воздухе до 1150 °С - материал и покрытия стойки в атмосфере, воде и щелочах» [20].
2	ПР-НХ17СР4	«Высокая стойкость к абразивному и эрозионному износу за счет высокопрочной фазы Cr ₇ C ₃ , коррозии в пресной и морской воде, солевых растворах, нефтесодержащих средах, устойчивость против окисления на воздухе» [20].	«- упрочняющие покрытия на деталях машин и оборудовании горячих цехов металлургических заводов - нефтяных погружных и грунтовых насосов, газоперекачивающих установок, горнодобывающей, дорожной и с/х техники - упрочнение шнеков экструдеров полимерных материалов и др. - твердость HRC до 60 - применение при температурах до 750 °С» [20].
3	ПР-ЦнЮ16 (ПГ-АН27)	«Применяются для нанесения коррозионностойких и износостойких покрытий» [20].	«- высокие антикоррозионные свойства» [20].
4	WC/Co 88/12	«Износостойкие покрытия для деталей, работающих при повышенных нагрузках» [20].	«- твердость HV до 1200 - стойкость к износу и коррозии в различных средах - кавитационная стойкость - хорошие свойства скольжения - устойчивость против газовой коррозии при высоких температурах» [20].
5	Плакарт-0.05-Н	«Износостойкие покрытия для деталей, работающих при повышенных нагрузках и высоких температурах» [20].	«- твердость HV до 1300 (боле 72 HRC) - стойкость к износу и коррозии в различных средах - кавитационная стойкость - применение при температурах до 870 °С - хорошие свойства скольжения - устойчивость против газовой коррозии при высоких температурах» [20].

2.5.2 Технологические параметры газопламенного напыления

Исходя из проведенного в работе аналитического обзора и исследования по теме, был разработан метод нанесения покрытия на внешнюю поверхность трубопровода, оборудования и резервуара метантенка методом газопламенного напыления. Данным метод включает следующие ряд операций:

- 1) активация поверхности струйно-абразивным методом;
- 2) напыление газопламенным методом (сверхзвуковое и дозвуковое);
- 3) локальное газопламенное или лазерное оплавление (в зависимости от технического задания);
- 4) финишная обработка – шлифованием (в зависимости от технического задания);
- 5) контроль качества.

1) Струйно-абразивная активация поверхности

«Струйно-абразивная активация поверхности, в зависимости от конфигурации и габаритных размеров обрабатываемого изделия, производится либо в рабочей камере струйно-абразивной установки, либо на открытой местности, в том числе в полевых условиях (активация внешних поверхностей магистральных нефте-, газо- и нефтепродуктопроводов). При этом используется сухой сжатый воздух, очищенный от абразивной эмульсии (пыль, ржавчина), конденсата и масла» [21].

Для обработки поверхностей металла в полевых условиях, в данной работе предлагается использование струйно-абразивного беспылевого оборудования Problast 60 SL. Основной особенностью этой установки является возможность отсасывать абразив после использования и вновь применить его для активизации поверхности.

2) Газопламенное напыление

«Для получения покрытий на малогабаритные детали и узлы оборудования газовой промышленности в данной работе используется горелка газопламенного напыления, сконструированная в ЦВТ ФГБОУ ТГУ.

Горелка работает в ручном режиме, имеет небольшие габариты, предназначена для работы в цеховых и полевых условиях. В комплект горелки входят насадки для оплавления получаемых покрытий и нанесения покрытий на внутренние поверхности отверстий (глубиной 400 мм), а также сменное сопло для получения сверхзвуковой (до 1500 м/с) скорости истечения рабочей смеси» [22].

«Для нанесения защитных покрытий на значительные площади подложки труб магистральных трубопроводов, НКТ, корпусов ЭЦН, жаровых труб установок подготовки газа и другого крупногабаритного оборудования газохимической промышленности или в целях получения особотвердых покрытий с пористостью $< 1\%$ в данном проекте предлагается к использованию высокопроизводительная мобильная установка высокоскоростного (HVAF) газопламенного напыления «Плакарт HVA-7», работающая на смеси горючих газов и воздуха» [22].

- 3) Локальное газопламенное или лазерное оплавление (в зависимости от технического задания)

«В ряде случаев для увеличения адгезионных свойств, уменьшения пористости получаемых покрытий и придания повышенной твердости поверхности, не прибегая к применению высокопроизводительного оборудования высокоскоростного напыления (Плакарт HVA-7) в данной работе предлагается выполнять оплавление после нанесения ГП с помощью лазера или специальной насадки на горелку конструкции ЦВТ ФГБОУ ТГУ» [22].

- 4) Финишная обработка – шлифованием (в зависимости от технического задания)

«Шлифование напыленного металла является последней операцией механической обработки, которая сообщает детали требуемые размеры и чистоту обработки поверхности.

В данной работе для операции финишного шлифования предлагается использовать следующее оборудование станок шлифовальный 3Д4230» [22].

5) Контроль качества

«Высокие эксплуатационные свойства деталей с защитными покрытиями обеспечиваются, прежде всего, стабильностью значений характеристик слоя и основы, а также стабильностью техпроцесса восстановления и упрочнения. Для защитных покрытий требуется их прочное сцепление с основой, однородная толщина покрытия, минимальная пористость, отсутствие микротрещин и т.д. Покрытие должно быть без вздутий, шелушения, трещин и включений. Твердость покрытия по Роквеллу (НРСэ) должна соответствовать твердости согласно требованиям технического задания.

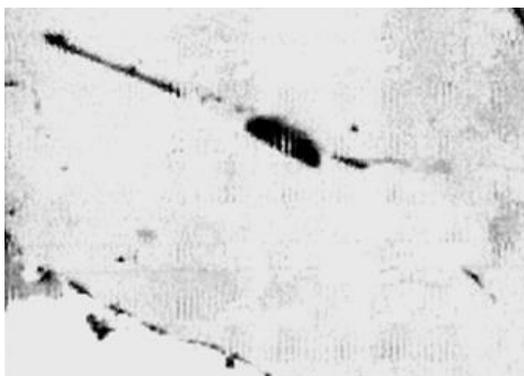
Ударная вязкость определяется при термоциклических испытаниях.

Шероховатость поверхности покрытия должна соответствовать требованиям чертежа на обрабатываемое изделие» [22].

Кроме того, после нанесения внешних газотермических коррозионостойких покрытий состава цинк-алюминий на корпусные изделия – для защиты от блуждающих токов и электропробоя и точечной коррозии и закрытия микропор, следует нанести дополнительное полимерное покрытие описанное в п. 3.4.

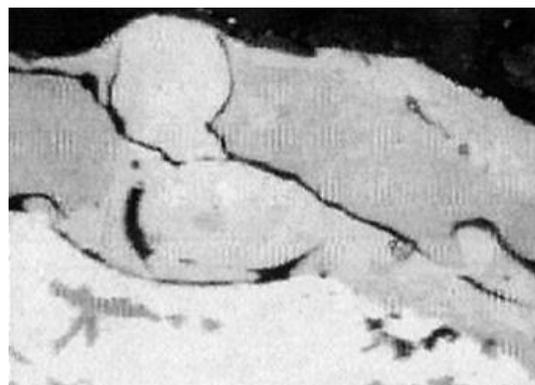
2.5.3 Свойство и структура покрытий

«Микроструктура покрытия (рисунки 17 – 18), полученного на образце газопламенным методом, имеет арочную, слоистую форму с минимальной повреждаемостью при знакопеременных динамических нагрузках. Можно отметить отсутствие значительных дефектов, четко выраженную адгезионную границу и тонкие границы между слоями (высокие когезионные свойства), что указывает на высокие механические свойства данного покрытия» [23].



×1000

Рисунок 17 – Когезионные свойства



×1000

Рисунок 18 – Адгезионные свойства

2.6 Экономическое обоснование предлагаемого покрытия

2.6.1 Краткая характеристика сравниваемых вариантов

В работе был проведен расчет экономической эффективности предлагаемой технологии газопламенного нанесения защитных покрытий на примере труб, применяемых при строительстве магистрального трубопроводного транспорта (таблица 14).

Таблица 14 – Варианты

Базовый вариант	Проектный вариант
Представляет собой применение трубы 60х3х6000 из нержавеющей стали Х18Н9Т	Представляет собой трубы 60х4х6000 из стали 10 с защитным ГП покрытием, нанесенными по предлагаемой технологии

2.6.2 Исходные данные, необходимые для проведения расчёта экономической эффективности

Таблица 15 – Исходные данные

№	Показатель	Усл. обозн.	Ед. измер.	Варианты	
				Базов.	Проект.
1	2	3	4	5	6
1	Годовая программа выпуска	$P_{Г}$	шт.	—	4138
2	Затраты на материалы	$C_{М}$	руб.	—	7934,2
3	Цена труб		руб./ед	13500	12531,33
4	Коэф. транспорт.-заготовит. расходов	$K_{Т-З}$	—	—	1,05
5	Часовая тарифная ставка	$C_{ч}$	руб./ч	—	75,29
6	Коэффициент доплат к основной заработной плате	$K_{д}$	—	—	1,88
7	Коэффициент отчислений на доп. з/п	$K_{доп}$	%	—	0,1
8	Коэф. отчислений на соц. нужды	$K_{сс}$	%	—	0,356
9	Балансовая стоимость оборудования	$C_{об.}$	руб.		2800000
10	Норма амортизационных отчислений на оборудование	$H_{а}$	%	—	13
11	Коэффициент полезного действия	$K_{ПД}$	—	—	0,85
12	Стоимость электроэнергии [24]	$C_{ээ}$	руб./кВт·ч	—	3,53
13	Стоимость воды	$C_{в}$	руб./м ³	—	5
14	Цена площади	$C_{пл}$	руб./м ²	—	9500
15	Площадь, занимаемая оборудованием	S	м ²	—	50
16	Стоимость эксплуатации площади	$C_{пл}$	руб./м ²	—	1800
17	Коэффициент затрат на монтаж (демонтаж) оборудования	$K_{монт}$	%	—	3
18	Нормативный коэф. эффективности доп. капитальных вложений	$E_{н}$	—	—	0,15
19	Срок службы изделия по базовому/проектному варианту	$T_{б}/T_{пр}$	лет	50	50
20	Норма амортизационных отчислений на площади	$H_{пл.}$	%	—	5
21	Коэффициент цеховых расходов	$K_{цех.}$	%	—	215
22	Коэффициент заводских расходов	$K_{зав.}$	%	—	250
23	Амортизационные отчисления на эксплуатацию площадей		%		2,4

2.6.3 Расчёт норм времени

По условиям технологического процесса за 1 смену (8 ч) происходит изготовление 6 изделий, причем все изделия изготавливаются одновременно.

Таблица 16 – Затраты рабочего времени на технологические операции

Вид работы	$t_{\text{маш.}}$	$t_{\text{всп.}}$	$t_{\text{обсл.}}$	$t_{\text{отл.}}$	$t_{\text{п-з.}}$	$t_{\text{шт.}}$
	ч	ч	ч	ч	ч	ч
Транспортировка труб	0,5	0,05	0,05	0,025	0,005	1,3608
Подготовка труб	0,5	0,05	0,05	0,025	0,005	1,3608
Нанесение покрытий	6	0,6	0,6	0,3	0,06	7,56
Охлаждение труб	0,28	0,028	0,028	0,014	0,0028	0,3528
Итого	6,28	0,628	0,628	0,314	0,0628	7,9128
Итого на 1 изделие						1,3188

2.6.4 Расчёт фонда времени работы оборудования и количества оборудования, необходимого по техпроцессу

Номинальный годовой фонд времени работы оборудования по формуле (12):

$$F_n = (D_p \cdot T_{\text{см}} - D_n \cdot T_n) \cdot C, \quad (12)$$

где D_p – количество рабочих дней в году;

$T_{\text{см}}$ – продолжительность смены (час);

T_n – количество часов, на которые сокращается смена в предпраздничные дни (по условию технологического процесса $T_n=0$);

D_n – количество предпраздничных дней;

C – количество смен.

Согласно формуле (12), номинальный годовой фонд времени работы оборудования равен:

$$F_n = (248 \cdot 8 - 8 \cdot 0) \cdot 33 = 5928 \text{ ч}$$

Эффективный фонд времени работы оборудования по формуле (13):

$$F_{\text{э}} = F_{\text{н}} \cdot \left(1 - \frac{B}{100}\right), \quad (13)$$

где B – плановые потери рабочего времени, $B = 7\%$.

Согласно формуле (13), эффективный фонд времени работы оборудования равен:

$$F_{\text{э}} = 5928 \cdot \left(1 - \frac{7}{100}\right) = 5513 \text{ ч}$$

Расчет производственной программы производства изделий по формуле (14):

$$P_{\text{г}} = D_{\text{п}} \cdot n_{\text{см}} \cdot C, \quad (14)$$

где $P_{\text{г}}$ – производственная программа производства изделий, шт./год
 $n_{\text{см}}$ – число изделий, производимых за смену (по условию технологического процесса $n_{\text{см}} = 6$).

Согласно формуле (14), производственная программа производства изделий составляет:

$$P_{\text{г.пр.}} = 248 \cdot 6 \cdot 3 = 4464 \text{ шт.}$$

2.6.5 Расчет общих капитальных затрат

Общие капитальные затраты по проектному варианту по формуле (15):

$$K_{\text{ОБЩ.ПР.}} = K_{\text{ОБ.ПР.}} + K_{\text{ПЛ.ПР.}} + Z_{\text{СОП.ПР.}}, \quad (15)$$

где $K_{\text{ОБ.ПР.}}$ – капитальные вложения в оборудование (руб.);

$K_{\text{ПЛ.ПР.}}$ – капитальные вложения в дополнительные площади (руб.);

$Z_{\text{СОП.ПР.}}$ – сопутствующие капитальные затраты (руб.).

Расчет капитальных вложений в оборудование по формуле (16):

$$K_{\text{ОБ.ПР.}} = C_{\text{ОБ.ПР.}} \cdot K_{\text{Т-З}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{ОБ.ПР.}}$ – стоимость приобретения нового оборудования (руб.);

$K_{\text{Т-З}}$ – коэффициент, учитывающий транспортно – заготовительные расходы на доставку оборудования;

В таблице 17 представлена ценовая категория каждого аппарата напыления защитного антикоррозионного покрытия.

Таблица 17 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена, руб/шт	Сумма
1	Комплекс высокоскоростного напыления Плакорт HVA-7	1	1450000	1450000
2	Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	1	450000	450000
3	Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	1	450000	450000
4	Кран-балка КМПэ 1т	1	97000	97000

Согласно формуле (16), капитальные вложения в оборудование составляют:

$$K_{\text{ОБ.ПР.}} = 2447000 \cdot 1,05 = 2569350 \text{ руб.}$$

Расчет капитальных вложений в дополнительные площади по формуле (17):

$$K_{\text{ПЛ.ПР.}} = C_{\text{ПЛ.}} \cdot S_{\text{ПР}}, \quad (17)$$

где $S_{\text{ПР}}$ – площадь по проектному варианту, м²;

$C_{\text{ПЛ.}}$ – стоимость приобретения площади, руб./м².

Согласно формуле (17), капитальные вложения в дополнительные площади составляют:

$$K_{\text{ПЛ.ПР.}} = 9500 \cdot 50 = 475000 \text{ руб.}$$

Расчет сопутствующих капитальных затрат по формуле (18):

$$Z_{\text{соп}} = Z_{\text{монт}}, \quad (18)$$

где $Z_{\text{монт}}$ – затраты на монтаж оборудования, руб.

Расчет затрат на монтаж оборудования по формуле (19):

$$Z_{\text{монт}} = Ц_{\text{об.пр.}} \cdot K_{\text{монт}} / 100, \quad (19)$$

где $K_{\text{монт}}$ – коэффициент, учитывающий затраты на монтаж проектного оборудования, %.

Согласно формуле (18) затраты на монтаж оборудования, а так же сопутствующие капитальные затраты, согласно формуле (19), составляют:

$$Z_{\text{монт}} = Z_{\text{соп.пр.}} = 2447000 \cdot 3 / 100 = 73410 \text{ руб.}$$

Общие капитальные затраты по проектному варианту, согласно формуле (15), составляют:

$$K_{\text{общ.пр.}} = 2569350 + 475000 + 73410 = 3117760 \text{ руб.}$$

Расчет дополнительных капитальных вложений составляет:

$$K_{\text{доп}} = K_{\text{общ.пр.}} = 3117760 \text{ руб.}$$

Расчет удельных капитальных вложений по формуле (20):

$$K_{\text{уд}} = K_{\text{общ}} / \Pi_{\Gamma}, \quad (20)$$

где Π_{Γ} – годовая программа выпуска, шт/год.

Согласно формуле (20) удельные капиталовложения составляют:

$$K_{уд.пр.} = 3117760/4464 = 698 \text{ руб.}$$

2.6.6 Расчет технологической себестоимости сравниваемых вариантов

Расчет затраты на основные материалы по формуле (21):

$$M_{осн.} = C_{м} \cdot K_{тз}, \quad (21)$$

где $C_{м}$ – стоимость материала;

$K_{тз}$ – коэффициент транспортно-заготовительных расходов;

В таблице 18 представлены затраты на материалы для газопламенного метода напыления защитного покрытия.

Таблица 18 – Затраты на материалы для газопламенного напыления

№	Наименование	Расход	Ед. изм.	Цена	Стоимость
1	Пропан	8,0	литр сжиж. газа	17	136
2	Порошок ПР-ЦнЮ16 (ПГ-АН27)	5	кг	1200	6000
3	Порошок ПВ-Н85Ю15	6	кг	1460	8760
4	Порошок ПР-НХ17СР4	4	кг	1765	7060
5	Порошок WC/Co 88/12	4	кг	1569	6276
6	Порошок Плакарт-0.05-Н	8	кг	900	7200
7	Труба стальная 60x4x6000	1	шт	1200	1200
Итого		–	–	–	7336
С учетом ТЗР		–	–	–	7702,8

Согласно данным расхода и цены из таблицы 19 наиболее экономически выгодным является использование порошка марки ПР-ЦнЮ16 (ПГ-АН27).

Затраты на основные материалы, согласно (21), составляют:

$$M_{осн} = 7336 \cdot 1,05 = 7702,8 \text{ руб.}$$

Расчет затрат на заработную плату основных производственных рабочих с отчислениями на социальные нужды:

1) Затраты на оплату труда:

а) Основная з/п по формуле (22):

$$Z_{осн.пр} = C_{ч} \cdot t_{шт} \cdot K_{д}, \quad (22)$$

где $C_{ч}$ – часовая тарифная ставка;

$K_{д}$ – коэффициент доплат к основной з/п;

$t_{шт}$ – норма времени на одно изделие, $t_{шт} = 1,32$.

Основная з/п составляет:

$$Z_{осн.пр} = 75,29 \cdot 1,32 \cdot 1,88 = 187 \text{ руб.}$$

б) Дополнительная з/п по формуле (23):

$$Z_{доп.} = Z_{осн.} \cdot K_{доп.}, \quad (23)$$

где $K_{доп.}$ – коэффициент отчислений на дополнительную з/п.

Согласно (23), дополнительная з/п составляет:

$$Z_{доп.пр.} = 187 \cdot 0,10 = 18,7 \text{ руб.}$$

2) Фонд оплаты труда $\Phi_{от}$ составляет:

$$\Phi_{от} = Z_{осн.} + Z_{доп.} = 187 + 18,7 = 208 \text{ руб.}$$

3) Отчисления на социальные нужды по формуле (24):

$$O_{сс} = \Phi_{от} \cdot K_{сс}, \quad (24)$$

где $K_{сс}$ – коэффициент отчислений на социальные нужды.

Согласно (24), сумма отчислений на социальные нужды составляет:

$$O_{cc.np.} = 208 \cdot 0,356 = 74 \text{ руб.}$$

4) Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования по формуле (25):

$$Z_{об} = A_o + P_{ээ} + P_v, \quad (25)$$

где $P_{ээ}$ – расходы на электроэнергию;

P_v – расходы на техническую воду;

а) Расчет амортизационных отчислений по формуле (26):

$$A_o = \frac{C_{об} \cdot H_a \cdot t_{маш}}{100 \cdot F_э}, \quad (26)$$

где $C_{об}$ – цена оборудования, руб;

H_a – норма амортизации оборудования

$F_э$ – годовой эффективный фонд времени работы оборудования

Полученные по формуле (26) значения амортизационных отчислений представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Амортизационные отчисления

№	Наименование оборудования	$C_{об}$, руб.	H_a , %	$t_{маш}$, час	Аморт. отчисления, руб
1	Комплекс высокоскоростного напыления Плакарт HVA-7	1450000	13	6	205,2
2	Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	450000		6	64
3	Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	450000		6	64
Итого					333,2
Итого, в пересчете на 1 изделие					55,53

б) Расчет расходов на электроэнергию по формуле (27):

$$P_{\text{ээ}} = \frac{M_y \cdot t_{\text{маш}} \cdot C_{\text{ээ}} \cdot n}{\text{КПД}_i}, \quad (27)$$

где M_y – мощность установки, кВт;

$C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии, руб.

Полученные по формуле (27) значения представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Расходы на электроэнергию

Наименование	Мощность, кВт	Кол-во, ед.	$t_{\text{маш}}$, час	Цена эл.эн, руб./кВт·ч	Итого, кВт·ч	Стоимость
Комплекс высокоскоростного Напыления Плакарт HVA-7	7,0	1	6	3,53	42	148,26
Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	5	1	6		30	106
Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	33	1	6		198	699
Итого						953,26
Итого, в пересчете на 1 изделие						159

Итого расходы на содержание и эксплуатацию оборудования согласно формуле (25):

$$Z_{\text{об.пр.}} = 55,53 + 159 = 214,53 \text{ руб}$$

Затраты на содержание, эксплуатацию и амортизацию производственных площадей по формуле (28):

$$Z_{\text{пл}} = A_{\text{пл}} + P_{\text{пл}}, \quad (28)$$

где $A_{\text{пл}}$ – амортизация площадей

$P_{\text{пл}}$ – расходы на эксплуатацию площадей, руб

Амортизационные отчисления по формуле (29):

$$A_{пл} = \frac{Ц_{пл} \cdot H_{пл} \cdot t_{ам} \cdot S}{100 \cdot F_9}, \quad (29)$$

где $Ц_{пл}$ – цена площади, руб;

$H_{пл}$ – норма амортизации площадей;

S – площадь, необходимая для технологического процесса, м².

Согласно (29), амортизационные отчисления составляют 16,34 руб.

Расходы на содержание и эксплуатацию площадей по формуле (30):

$$P_{пл.экс.} = \frac{C_{экс.} \cdot t_{ми} \cdot S}{F_9} \quad (30)$$

где $C_{экс.}$ – стоимость эксплуатации площади, руб.

Согласно (30), расходы на содержание и эксплуатацию площадей составляют 147,35 руб.

Итого, затраты на производственные площади, согласно (28):

$$З_{пл.пр.} = 16,34 + 147,35 = 163,69 \text{ руб.}$$

Технологическая себестоимость упрочнения детали по формуле (31):

$$C_{тех} = M + \Phi_{от} + O_{сс} + P_{пл} + З_{пл} \quad (31)$$

Согласно (31), технологическая себестоимость упрочнения детали составляет 8295,84 руб.

2.6.7 Расчет цеховой себестоимости упрочнения детали

Расчет цеховой себестоимости упрочнения детали по формуле (32):

$$C_{цех} = C_{тех} + P_{цех} \quad (32)$$

$$P_{\text{цех}} = 3 \cdot K_{\text{осн}} \cdot K_{\text{цех}} / 100, \quad (33)$$

где $K_{\text{цех}}$ – коэффициент цеховых расходов.

Согласно формулам (32) и (33), цеховая себестоимость упрочнения детали составляет:

$$P_{\text{цех.пр.}} = 187 \cdot 215 / 100 = 402,05 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{цех.пр.}} = 8295,84 + 402,05 = 8697,89 \text{ руб.}$$

2.6.8 Заводская себестоимость упрочнения детали

Заводская себестоимость упрочнения детали рассчитывается по формуле (34):

$$C_{\text{зав}} = C_{\text{цех}} + P_{\text{зав}} \quad (34)$$

$$P_{\text{зав}} = 3 \cdot K_{\text{осн}} \cdot K_{\text{зав}} / 100, \quad (35)$$

где $K_{\text{зав}}$ – коэффициент заводских расходов.

Согласно формулам (34) и (35), заводская себестоимость упрочнения детали составляет:

$$P_{\text{зав.}} = 187 \cdot 250 / 100 = 467,5 \text{ руб}$$

$$C_{\text{зав.пр.}} = 8697,89 + 467,5 = 9165,39 \text{ руб}$$

2.6.9 Полная себестоимость упрочнения детали

$$C_{\text{полн.}} = C_{\text{зав.}} + P_{\text{вн.}}, \quad (36)$$

где $P_{\text{вн.}}$ – внепроизводственные расходы

$$P_{\text{вн.}} = C_{\text{зав.}} \cdot \frac{K_{\text{вн.}}}{100}, \quad (37)$$

где $K_{\text{вн.}}$ – коэффициент внепроизводственных расходов, %.

$$P_{\text{вн.}} = 9165,39 \cdot \frac{5}{100} = 458,27 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{полн.}} = 9165,39 + 458,27 = 9623,66 \text{ руб.}$$

2.6.10 Отпускная цена предприятия на изготавливаемую деталь

$$C_{отп.} = C_{полн.} + ПР, \quad (38)$$

где ПР – прибыль предприятия, руб.

$$ПР = C_{полн.} \cdot \frac{K_{пр.}}{100}, \quad (39)$$

где $K_{пр.}$ – коэффициент, учитывающий прибыль предприятия (%).

$$ПР = 9623,66 \cdot \frac{30}{100} = 2887,1 \text{ руб.}$$

$$C_{отп.} = 9623,66 + 2887,1 = 12510,76 \text{ руб.}$$

2.6.11 Калькуляция и структура полной себестоимости и цены упрочнения детали

Таблица 21 – Калькуляция и структура отпускной цены производимого изделия

№ п/п	Показатели	Усл. обозн.	Калькуляция, руб.	Структура, %
			проектный вариант	
1	Фонд оплаты труда	$\Phi_{от.}$	208	1,6 %
2	Отчисления на соц. нужды	$O_{сс}$	74	0,6 %
3	Затраты на оборудование	$Z_{об.}$	214,53	1,6 %
4	Затраты на площади	$Z_{пл.}$	163,69	1,26 %
5	Затраты на основные материалы	$M_{осн.}$	7702,8	62 %
	Себестоимость технологическая	$C_{тех.}$	8295,84	-
6	Цеховые расходы	$P_{цех.}$	402,05	3,1 %
	Себестоимость цеховая	$C_{цех.}$	8697,89	-
7	Заводские расходы	$P_{зав.}$	467,5	3,6 %
	Себестоимость заводская	$C_{зав.}$	9165,39	-
8	Внепроизводственные расходы	$P_{вн.}$	458,27	3,7%
	Полная себестоимость	$C_{полн.}$	9623,66	-
9	Прибыль предприятия	ПР	2887,1	23,1 %
	Отпускная цена	$C_{отп.}$	12510,76	100%

2.6.12 Экономический эффект в сфере эксплуатации

Если предполагается экономический эффект в сфере эксплуатации, за счет повышения качества продукции (повышения долговечности), то расчет производится по формуле (40):

$$\mathcal{E}_{\text{экон.}} = \left(C_{\text{б}} \cdot \frac{T_2}{T_1} - C_{\text{пр}} \right) \cdot P_{\Gamma} - E_{\text{H}} \cdot K_{\text{пр.дон}}, \quad (40)$$

где T_2 и T_1 – срок службы по проектному и базовому вариантам соответственно.

$$\mathcal{E}_{\text{экон.}} = \left(13500 \cdot \frac{50}{50} - 12510,76 \right) \cdot 4138 - 0,15 \cdot 3117760 = 3625811,12 \text{ руб.}$$

Выводы к разделу 2:

За счет снижения стоимости изделия экономический эффект в сфере эксплуатации от внедрения данной технологии составит 3625811,12 рублей в год.

В данном разделе было предложено использование полимерного антикоррозионного покрытия для внутренней поверхности метантенка и гибридного покрытия для внешней поверхности. Проведено экономическое и теоретическое обоснование использования антикоррозионного покрытия.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были выполнены следующие задачи:

- 1) рассмотрена проблема коррозионного воздействия органических отходов и внешней среды;
- 2) проанализированы возможности применения антикоррозионного покрытия как способ повышения ресурса работы оборудования анаэробного сбраживания;
- 3) проведено теоретическое обоснование применения покрытия;
- 4) выявлено экономическое преимущество использования гибридного покрытия (полимерного и газопламенного) перед применением дорогих объемно-легированных нержавеющей сталей;

Исследование показало теоретическую целесообразность применения покрытий в качестве теплоизоляции с целью улучшения теплового баланса метантенка.

Расчет тепловых потерь метантенка без антикоррозионного покрытия показывает, что потери тепла аппарата, изготовленного из нержавеющей сталей, составляют 4440 МДж в год, это доказывает необходимость использования защитных покрытий.

Расчет экономической целесообразности применения предлагаемой в проекте технологии нанесения защитных покрытий показывает, что годовой экономический эффект согласно проведенным расчетам составляет 3625811,12 рублей в год.

Список используемых источников

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. 888 с.
2. Лазуткина О. Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии: учебное пособие / О. Р. Лазуткина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 140 с.
3. Рекомендации по первичной защите бетона сооружений биологической очистки сточных вод / Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона Госстроя СССР (НИИЖБ) Макеевский инженерно-строительный институт Минвуза УССР. Утверждены директором НИИЖБ 17 августа 1985 г. Москва. 1985 г.
4. Яковлев Б.Н. Категорирование сооружений метантенков по взрывной и пожарной опасности // Вестник СГТУ. 2007. №2.
5. Коррозия железобетонных конструкций и причины ее возникновения / Е. М. Жуков, Ю. И. Кропотов, И. А. Лугинин [и др.]. // Молодой ученый. 2016. № 7 (111). С. 78-80.
6. Богачев А. П., Савочкин В.С. Каталог новых технологических и конструктивных решений в строительном производстве: справочно-информационное издание /А. П. Богачев, В. С. Савочкин. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. 48 с.
7. ГОСТ 9.908-85 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости (с Изменением N 1).
8. Микробная коррозия и ее возбудители / Е.И. Андреюк, В.И. Билай, Э.З. Коваль, И.А. Козлова. – Киев: Наукова думка, 1980. – 288 с.
9. Микробная коррозия и ее возбудители / Е.И. Андреюк, В.И. Билай, Э.З. Коваль, И.А. Козлова. – Киев: Наукова думка, 1980. – 288 с

10. Троицкий В.А. Ультразвуковая диагностика эксплуатационных дефектов в конструкциях нефтегазового комплекса / В.А. Троицкий, В.П. Дядин, Е.А. Давыдов // Автоматическая сварка. – 2010. – № 9. – С. 45
11. Ракова Т.М., Козлова А.А., Нефедов Н.И., Лаптев А.Б. Исследование влияния органических и неорганических ингибиторов коррозии на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей // Труды ВИАМ. 2017. №6 (54).
12. Рекомендации по учету влияния технико-технологических, природно-климатических и других факторов при прогнозировании аварийности на МГ ОАО «Газпром». – М.:ОАО «Газпром», 2007. – 118 с.
13. Сурис, М. А. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии [Текст]: учебное пособие / М. А. Сурис, В. М. Липовских. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 213 с.
14. Васенев В.В., Ильин Ю.П., Круглов Г.А. Тепловой баланс метантенка биогазовой установки // ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» (ЧГАА). 2015. Т. 72. № 2. С. 29-32.
15. ГОСТ 5632-72. Сталит высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). Дата введения 01.01.1975.
16. Патент 2281254С1 РФ МПК С02F3/28 С02F11/04, Горизонтальный метантенк / Дианов Леонид Васильевич, Маслов Максим Михайлович.
17. Патент 2394058С2 РФ МПК С09FD 163/02 С09D 5/08, Полимерная композиция для защитного антикоррозионного покрытия барьерного типа/ Буков Николай Николаевич, Горохов Роман Вячеславович, Левашов Андрей Сергеевич, Мнацаканова Елена Юрьевна.
18. Патент 2 321164С2 РФ МПК С23С 4/12, Способ газопламенного напыления металлических порошковых материалов/ Гедзь Андрей Джонович, Коберниченко Анатолий Борисович, Ухалин Александр

Сергеевич, Ефремов Владимир Владимирович, Шульчевский Юрий Геннадьевич.

19. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 ноября 2013 г. N 558 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы»». Зарегистрировано в Минюсте России 31 декабря 2013 г. N 30993.

20. Лаборатория металлографии [Текст] / Е.В. Панченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1965 – 439 с.

21. Прядко, А.С. Влияние подготовки поверхности на качество антикоррозионных покрытий при активированной дуговой металлизации [Текст] / А.С. Прядко, Ю.С. Коробов, А.Е. Черепко // Наплавка и напыление как эффективные способы повышения срока службы деталей машин и оборудования. Тез. докл. Российской НТК. – Екатеринбург, 2002. – С. 96–99.

22. ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования».

23. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах. – Сер. 27. – Вып. 1. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2005, 118 с.

24. Ценовой калькулятор электрической энергии и мощности для юридических лиц. [Электронный ресурс] URL: <http://www.fstrf.ru/calc>

25. Joseph Riskin, Alexander Khentov. Electrodes for Metal Protection Against Corrosion Attack by Leakage Currents in Electrochemical Plants / Electrocorrosion and Protection of Metals, 2019 – 335-336 с.

26. Отходы в России: мусор или ценный ресурс? Сценарии развития сектора обращения с твердыми коммунальными отходами / Международная финансовая корпорация (IFC, Группа Всемирного банка). 2013. 92 с. URL: <http://biotech2030.ru/wp-content/uploads/2018/04/Othody-v-RF.pdf>.

27. Biswanath Saha, Chaichi Devi, Meena Khwairakpam, Ajay S. Kalamdhad. Vermicomposting and anaerobic digestion – viable alternative options for terrestrial weed management – A review – 70-76 с.

28. Безотходное производство: биогазовый комплекс в поселке Плодовое обеспечит племенной завод электричеством / Интернет-портал 47Channel. 23.10.2019. URL:

29. J. M. Tarragó, G. Fargas, L. Isern, S. Dorvlo. Microstructural influence on tolerance to corrosion-induced damage in hardmetals, 2016 – 36-43.

30. S. Mani, J. Sundaram, K. C. Das. Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter, 2016 – 158-167.

31. Stanislava Mlinar, Alfons R. Weig, Ruth Freitag. Influence of mixing and sludge volume on stability, reproducibility, and productivity of laboratory-scale anaerobic digestion / Bioresource Technology Reports, 2020 – 2 с.