

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Современные материалы и технологии их производства

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Конструкция реактора для производства биологического газа из
животноводческих отходов

Обучающийся

Рахматов Н.Х

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент К.В. Моторин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Бакалаврскую работу выполнил студент: Рахматов Н.Х.

Тема бакалаврской работы: Конструкция реактора для производства биологического газа из животноводческих отходов.

Целью работы является повышение эффективности производства биогаза за счёт добавления нагревательного оборудования для поддержания и повышения температуры внутри биореактора.

Актуальность работы: В современном мире основной проблемой животноводческих отходов заключается в их количестве. В государственных фермах скот очень много и их отходы в большей степени сжигают, или используют для производства биогаза. Но так же есть частные фермы у которых скот не в таких масштабов как государственных, им перевозить и сжигать отходы животных затратное дело.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки, изложенной на 58 страницах, записка включает введение, 3 раздела и список используемых источников, в которые включены 5 иностранных используемых источников.

В первом разделе был проведен обзор существующих конструкций биогазовых реакторов, а так же предложена разработанная конструкция биореактора. Проведен анализ материалов для корпуса биореактора и выбрана нержавеющая высоколегированная сталь. Проведен анализ возможных способов сварки корпуса биореактора.

Во втором разделе данной работы предложен технологический процесс сборки и сварки изготовления корпуса биореактора.

В третьем разделе был проведен выбор оборудования с нужными параметрами для более качественного и эффективного изготовления корпуса биореактора.

Содержание

Введение.....	4
1 Конструкции реакторов для биогаза	6
1.1 Обзор существующих конструкций реакторов для биогаза.....	6
1.2 Принцип работы биогазового реактора.....	13
1.3 Анализ и выбора материала для корпуса биореактора	16
1.4 Описание конструкции биореактора.....	31
1.5 Анализ возможных способов сварки корпуса биореактора	33
2 Технологический процесс сборки и сварки корпуса реактора.....	43
2.1 Выбор размера прокатного листа по ГОСТУ	43
2.2 Разметка	43
2.3 Резка.....	44
2.4 Гибка.....	45
2.5 Сборка	45
2.6 Сварка.....	46
2.7 Контроль	47
2.8 Дополнительный источник тепла для поддержания температуры внутри биореактора.....	49
3 Выбор оборудования для изготовления корпуса биореактора.....	50
3.1 Оборудование для резки.....	50
3.2 Оборудование для гибки	52
3.3 Стенд для сварки и сборки корпуса биореактора.....	54
Заключение	56
Список используемых источников.....	57

Введение

«В современных условиях, когда мир сталкивается с проблемами изменения климата и истощения традиционных источников энергии, исследование новых методов разработки реакторов для производства биогаза становится особенно важным. Альтернативные источники энергии привлекательны не только с точки зрения снижения зависимости от ископаемых ресурсов, но и в контексте необходимости ухаживать за экологией планеты. Возобновляемые источники, такие как биогаз, представляют собой не только способ получения энергии, но и эффективное решение проблемы утилизации животноводческих отходов, которые могут причинять значительный вред окружающей среде» [15].

«Производство биогаза из органических отходов — это процесс, в который вовлечены различные микробиологические и химические реакции, приводящие к образованию метана, углекислого газа и других продуктов, которые могут быть использованы для получения электроэнергии, тепла или топлива. Такой подход адаптирует старые отходы в новые ресурсы, что делает его очень актуальным для сельскохозяйственных и промышленных предприятий, стремящихся к устойчивому развитию и минимизации своей углеродной нагрузки. На фоне глобального роста населения и увеличения потребления ресурсов, эффективное использование животноводческих отходов становится важной задачей. В этом контексте необходимы современные конструктивные решения, позволяющие повысить выход биогаза и уменьшить эксплуатационные затраты» [15].

«Современные технологии переработки органических отходов не стоят на месте, однако необходимо учитывать, что каждая конструкция реактора имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Образование биогаза из сельскохозяйственных отходов требует высокой степени контроля за процессами, протекающими внутри реактора, что в свою очередь

обуславливает необходимость внедрения инновационных материалов и технологий проектирования. Это работа направлена на создание конкурентоспособных и эффективных решений, что позволит улучшить производственные показатели и сделать их более экономичными и безопасными. По этой причине разработка новых реакторов, способных адаптироваться к различным типам исходного сырья» [17].

На данный момент известные конструкции биогазовых реакторов имеют хорошие достоинства, имея так же многочисленные недостатки. Используют разные виды материалов для создание биогазовых конструкций, но более используемым и эксплуатационным материалом являются металлические. Металлические конструкции имеют свои многочисленные недостатки, такие как поддержание эффективных процессов работы биореактора, потому что сильно действуют коррозионные свойства на них при долгой эксплуатации.

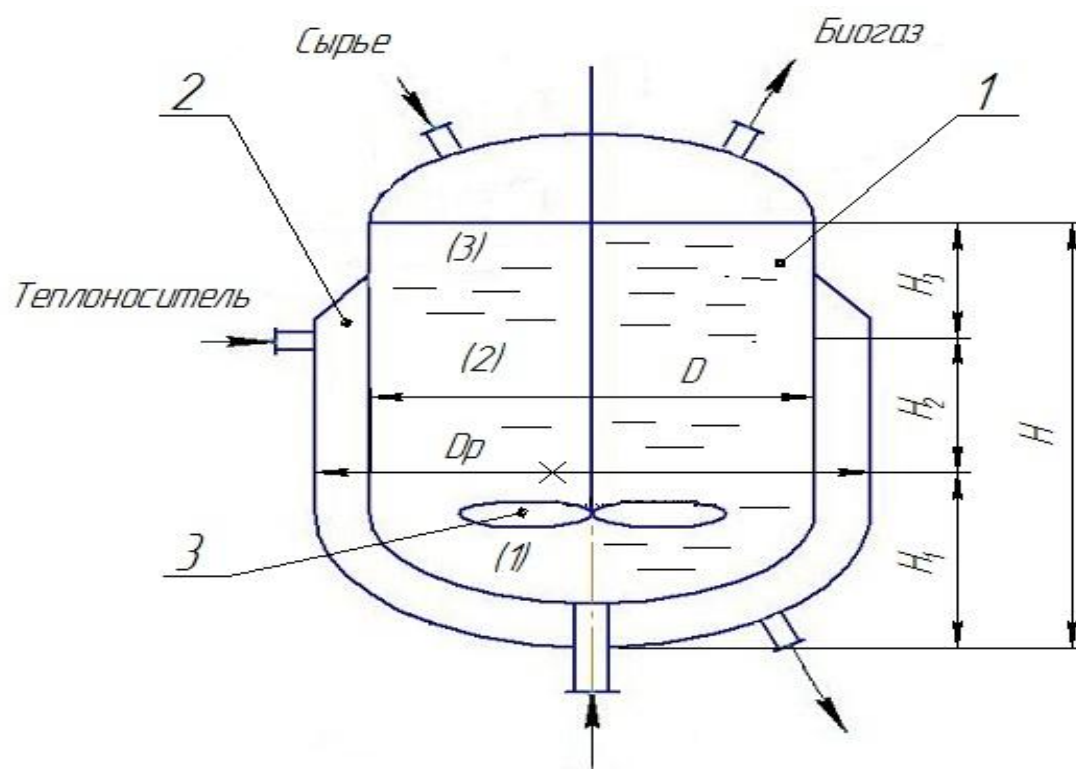
Известные конструкции газовых реакторов не всегда являются эффективными. Поэтому цель данной работы заключается в оптимальной конструкции реактора, который будет эффективно производить биогаз из отходов животноводства.

1 Конструкции реакторов для биогаза

1.1 Обзор существующих конструкций реакторов для биогаза

«В последние десятилетия конструкции реакторов для производства биогаза претерпели значительные изменения, направленные на повышение их эффективности и эксплуатационной надежности. Существуют различные модели анаэробных реакторов, каждая из которых имеет уникальные характеристики и способы применения в зависимости от типа сырья и условий эксплуатации. Обзор основных типов конструкций позволит оценить их сильные и слабые стороны, а также выявить возможности для дальнейшего усовершенствования» [19].

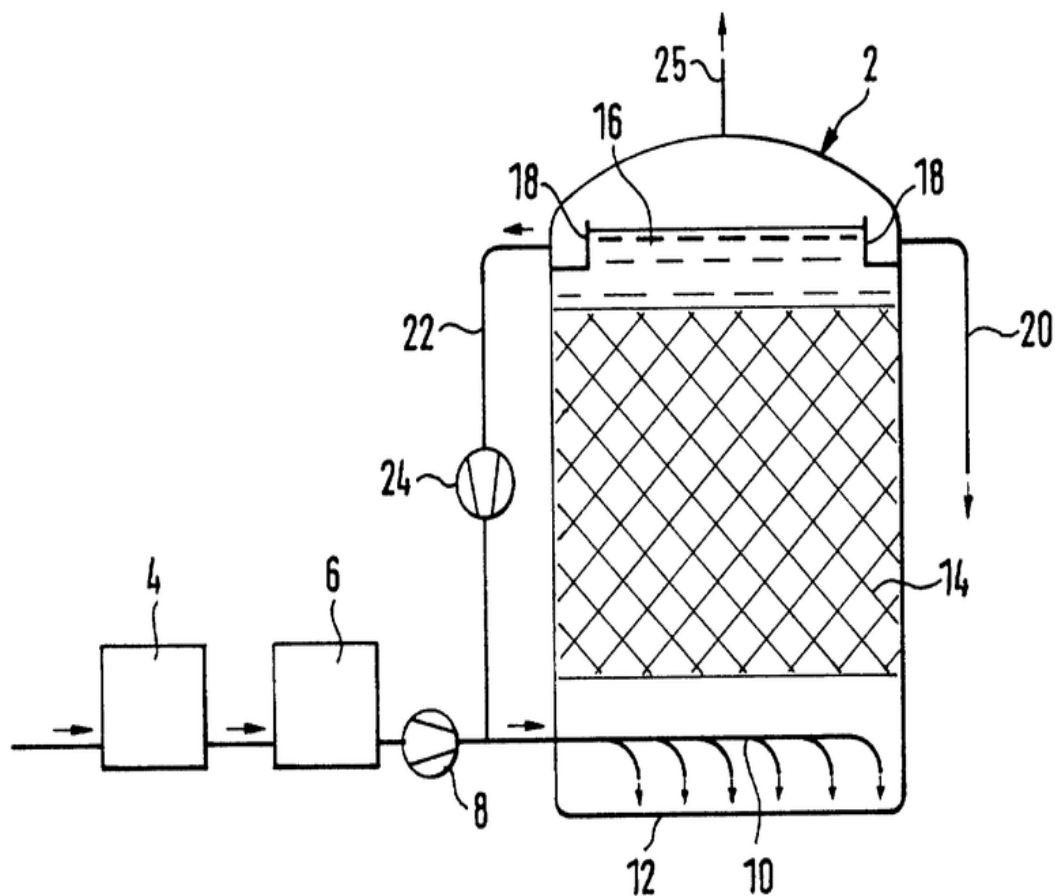
«Одним из самых распространенных типов реакторов являются мешалки анаэробного сбраживания (рисунок 1), которые активно используются для переработки животноводческих и сельскохозяйственных отходов. Эти реакторы обеспечивают хорошее перемешивание субстрата, что содействует повышению скорости биохимических реакций. Модель мешалки обычно включает в себя механические системы, позволяющие обеспечить равномерное распределение сырья и адекватное теплообмен. Однако такие конструкции могут сталкиваться с проблемами, связанными с износом механических частей и необходимостью регулярного обслуживания» [19].



1 – корпус реактора; 2 – рубашка; 3 - мешалка

Рисунок 1 – Реактор анаэробного сбраживания

Другим известным типом является реактор с неподвижным слоем (рисунок 2), в котором используются специальные наполнители для увеличения площади контакта между микроорганизмами и субстратом. Эта конструкция часто применяется в условиях, когда необходимо минимизировать затраты на перемешивание и обеспечить стабильность процесса анаэробного сбраживания. Однако такие реакторы имеют ограничения по скорости переработки, что может сказаться на общей производительности.



Фиг. 1

2 – биореактор; 4 – резервуар; 6 – теплообменник; 8 – насос; 10 - распределительной системы трубопровода; 12 – дно; 14 – элемент носитель; 16 – зона оттаивания; 18 – переливное устройство; 20 – сливной трубопровод; 22 – рециркуляционный трубопровод; 24 – насос; 25 – верхний трубопровод

Рисунок 2 – Реактор с неподвижным слоем

Среди новых подходов стоит отметить и реакторы с вертикальным потоком (рисунок 3), которые проектируются для оптимизации переработки биомассы с высокой влажностью. Эти конструкции обеспечивают более равномерное распределение потока, что способствует улучшению показателей выхода биогаза. Они также имеют потенциальные преимущества в плане снижения затрат на прокачку и электроэнергию.

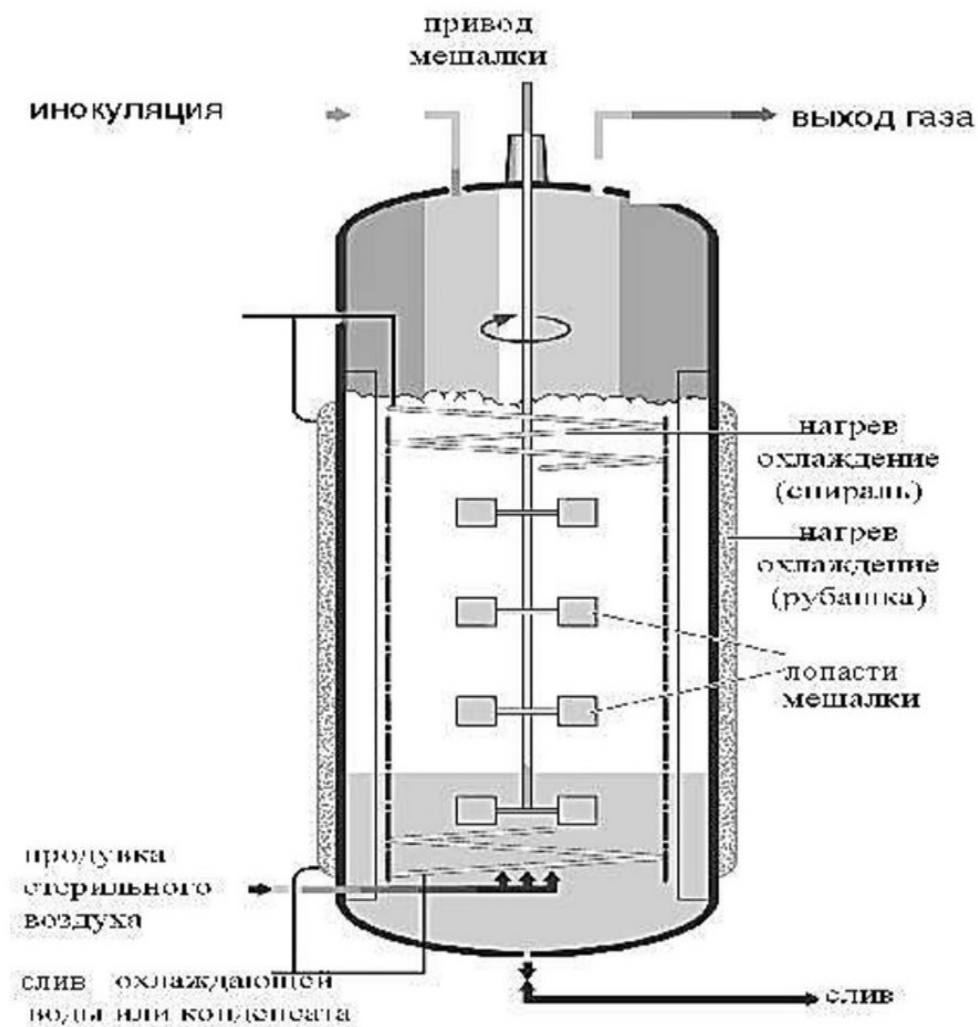
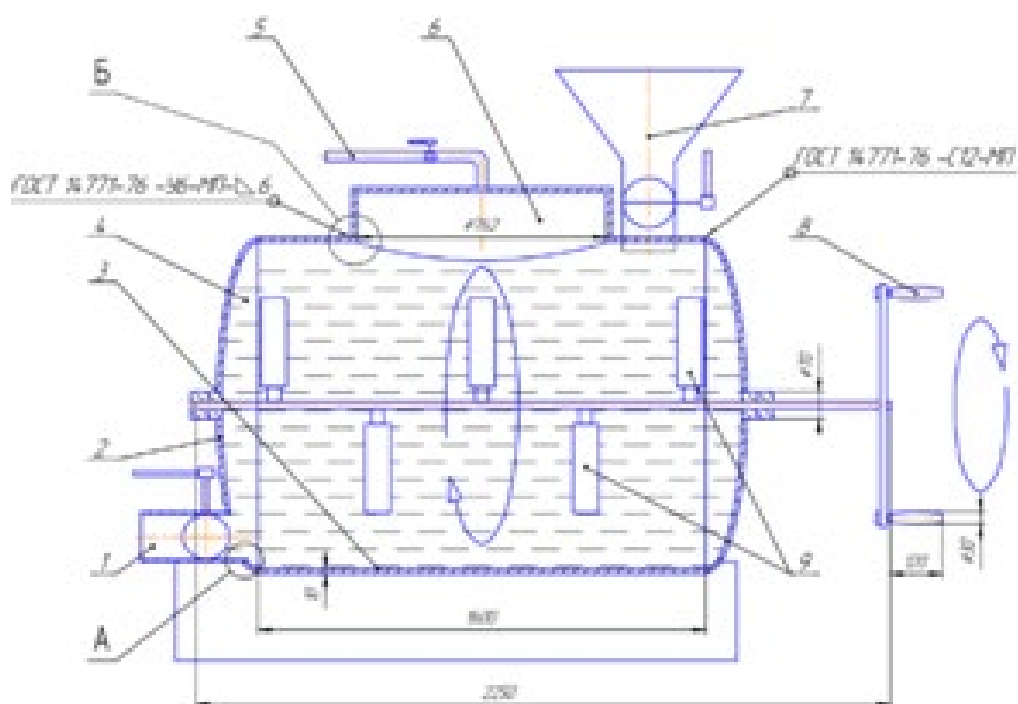


Рисунок 3 – Реактор с вертикальным потоком

У каждого типа реакторов есть свои достоинства и недостатки, и оптимальный выбор конструкции зависит от множества факторов, включая доступные ресурсы, тип отходов и специфические требования к производству биогаза. Более того, такое разнообразие конструкций открывает возможности для разработки многослойных систем, где разные типы реакторов смогут работать в связке, повышая общую эффективность переработки.



1 – выходная труба для биоудобрения; 2 – боковая часть корпуса биогазовой установки; 3 – обечайка корпуса биогазовой установки; 4 – биомасса; 5 – выходная труба для биогаза; 6 – горловина для накопления биогаза; 7 – воронка для загрузки отходов животноводства; 8 – ручка мешалки; 9 – лопатки для перемешивания содержимого

Рисунок 4 – Реактора с горизонтальным потоком

Горизонтальные биореакторы (рисунок 4) представляют собой эффективные установки для анаэробной переработки органических отходов, в том числе отходов животноводства, таких как навоз. Они способствуют оптимизации процесса получения биогаза, обеспечивая высокую производительность и эффективность

Горизонтальные биореакторы функционируют по принципу непрерывного потока, при котором субстрат непрерывно перемещается через реактор, обеспечивая равномерное перемешивание и контакт с микроорганизмами. Это способствует высокой эффективности переработки и максимальному получению метана. Например, исследования показывают, что применение горизонтальных анаэробных реакторов для обработки свиных

сточных вод может снизить химическое потребление кислорода (COD) на 68% и обеспечить производство метана в размере 0,30 Л CH₄ на грамм убранный COD.

Преимущества горизонтальных биореакторов. Эффективное перемешивание: Горизонтальные реакторы обычно оснащены системами смешивания, которые способствуют равномерному распределению субстрата и микроорганизмов, что ускоряет процесс разложения органических веществ. Упрощенная конструкция: Эти реакторы обладают менее сложной конструктивной схемой по сравнению с вертикальными аналогами, что облегчает их эксплуатацию и техническое обслуживание. Высокая выходность биогаза: Исследования подтверждают, что горизонтальные реакторы способны достигать высокой концентрации метана, что делает их более экономически выгодными для производства энергии.

Горизонтальные биореакторы способны эффективно перерабатывать навоз и иные отходы животноводства. Так, в одном исследовании было обнаружено, что сочетание сельскохозяйственных и животноводческих остатков с бытовыми стоками в горизонтальном реакторе позволило получить 965,55 NL биогаза, при этом содержание метана достигало 86%.

Горизонтальные биореакторы являются перспективной технологией для превращения животноводческих отходов в биогаз. Благодаря высокой эффективности, простоте использования и возможностям масштабирования, они представляют собой оптимальный вариант для фермерских хозяйств и предприятий по переработке отходов.

Окончательный выбор конструкции реактора требует комплексного подхода и тщательного анализа, который обеспечит материалами, готовыми к внедрению для достижения устойчивого и эффективного производства биогаза. Учитывая постоянно растущие требования к качеству и устойчивости биотоплива и его производства, необходимо искать новые решения, которые будут основаны на сочетании существующих конструкций и новых

материалов, позволяющих улучшить характеристики реакторов. Все виды форм биогазовых установок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки одноступенчатых биогазовых установок в зависимости от формы конструкции и его расположения относительно горизонта [3]

Вид	Недостатки	Достоинства
Горизонтальная установка	- занимает большую площадь - ограниченность объёма до 1000 м - к объёму сырья приходится большая площадь поверхности	- удобство в эксплуатации - возможность применения мощных и надежных мешалок - возможность наибольшей загрузки - удобство разрушения корки
Вертикальная установка	- используется в основном для больших станций - высокие требования к смесительной технике	- компактность - неограниченность объема
Наклонная установка	- не имеет определенного времени пребывания массы в реакторе - подземное расположение камеры сбрасывания ухудшает теплотехнические показатели	- наклонное расположение облегчает стекание шлама к выгрузному отверстию, лучше заполнение, перемешивание
Цилиндрическая форма	- худшие условия для перемешивания - образование трещин в углах	- простая технология изготовления - к объёму сырья приходится маленькая площадь поверхности
Цилиндрическая коническая форма	- сложность конструкции	- простая технология изготовления - оптимальная форма для разрушения корки при перемешивании - обеспечивает удаление сверху корки, снизу – отстоявшегося субстрата (шлама)
Овальная форма	- сложность конструкции - высокая стоимость изготовления	- наилучшие условия для перемешивания и отвода осадков, разрушения плавающей корки

Таким образом, в результате проведенного анализа можно сделать вывод, что для повышения эффективности работы биореактора, и ускорения реакции, в установку следует добавить подачу воды и установить подогрев смеси. Для этого надо предусмотреть трубу для заливки воды, а под днищем реактора расположить нагревательные элементы.

1.2 Принцип работы биогазового реактора

Изучение принципов работы реакторов для производства биогаза включает в себя анализ процессов, происходящих внутри этих систем, а также материалов, используемых при их конструировании.

Принцип действия анаэробного реактора основан на биохимических процессах, которые происходят при отсутствии кислорода и обеспечивают разложение органических веществ с образованием биогаза, состоящего в основном из метана и углекислого газа.

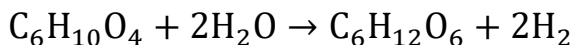
Внутри реактора находятся микроорганизмы, наиболее известные из которых — метаногены, которые играют ключевую роль в превращении органического материала в биогаз.

Процесс анаэробного сбраживания можно разделить на несколько этапов:

- гидролиз;
- ацидогенез;
- ацетогенез;
- метаногенез.

«На первом этапе гидролиза сложные органические соединения расщепляются до простых молекул, таких как сахара, жирные кислоты и аминокислоты. Этот процесс зависит от условия работы реактора, температуры

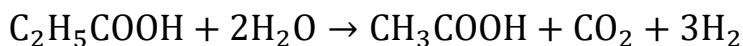
и pH. Каждый из этих факторов имеет прямое влияние на активность микроорганизмов» [9].



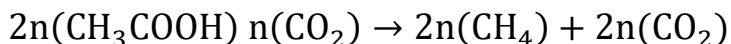
«После гидролиза, на стадии ацидогенеза, продукты расщепления превращаются в органические кислоты, диоксид углерода и водород» [17].



«На следующем этапе — ацетогенез — происходит дальнейшее разложение органических кислот, в результате чего образуются уксусная кислота и молекулы водорода» [17].



«На завершающем этапе, метаногенез, уксусная кислота и водород превращаются в метан и углекислый газ, что как раз и составляет основную ценность производимого биогаза» [17].



Скорость процесса брожения сильно зависит от температуры.

Существует три режима брожения:

- Психрофильный – при температуре 15-25°C;
- Мезофильный – при температуре 30-40°C;
- Термофильный – при температуре 45-55°C

Данные о сравнительных показателях переработки отходов животноводства приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительные показатели анаэробной переработки отходов животноводства [17]

Показатели	Мезофильное сбраживание (t=35)	Термофильное сбраживание (t=55)
Время сбраживание, сут	35-40	5-7
Выход биогаза, м3/сут*м3	1,1	6,5

Помимо этого, некоторые конструкции реакторов включают в себя теплоизоляционные материалы, что позволяет поддерживать оптимальную температуру для активной работы метаногенных микроорганизмов. Это, в свою очередь, способствует повышению выхода биогаза и улучшению его качества (рисунок 5).

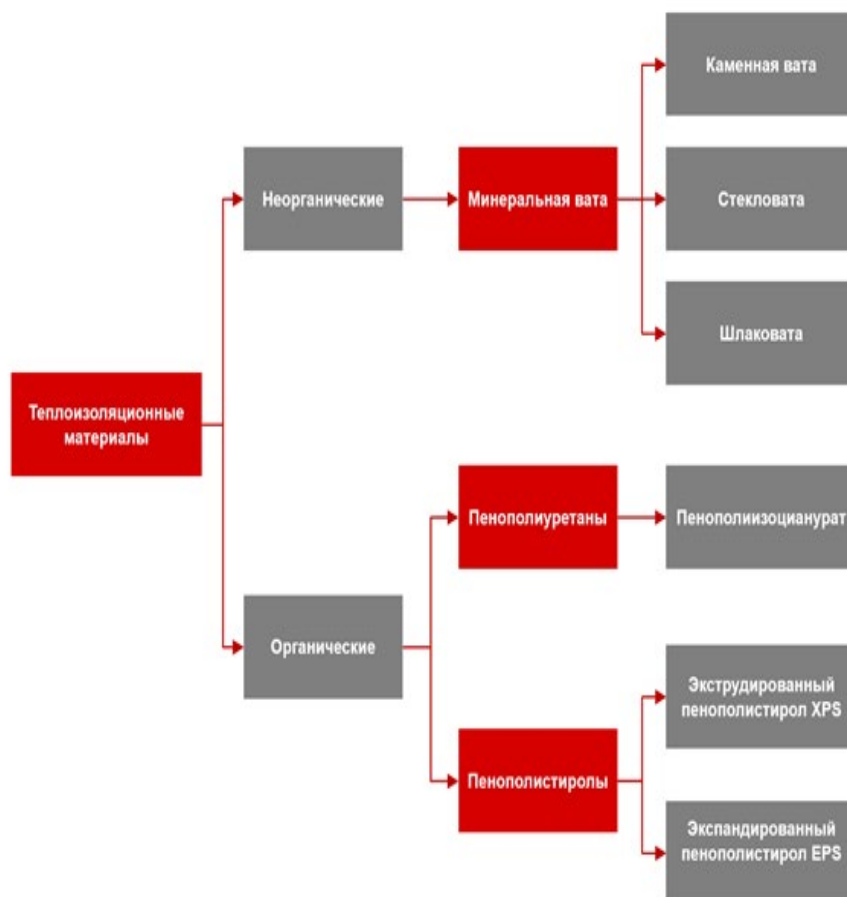


Рисунок 5 – Схема теплоизоляционных материалов

В заключение, принципы работы анаэробных реакторов основаны на сложных биохимических процессах, которые требуют качественно различных подходов как к выбору материалов, так и к конструкции и системам управления. Эффективность производства биогаза зависит от правильной комбинации этих факторов и постоянного совершенствования технологий, что в конечном итоге обеспечит устойчивую и эффективную переработку органических отходов

1.3 Анализ и выбор материала для корпуса биореактора

«При строительстве реакторов для производства биогаза выбор материалов имеет огромное значение для обеспечения их долговечности, эффективности и общих эксплуатационных характеристик. Современные технологии предлагают широкий спектр материалов, которые могут использоваться в конструкции реакторов, и каждый из них обладает уникальными свойствами, которые влияют на протекание биохимических процессов внутри оборудования» [20].

«Одним из наиболее распространенных материалов для строительства реакторов является нержавеющая сталь. Она обладает высокой коррозионной стойкостью к агрессивной среде, которая образуется в процессе анаэробного сбраживания. Нержавеющая сталь также демонстрирует отличные механические свойства и может быть легко обработана, что позволяет создавать конструкции с различными конфигурациями. Однако стоимость нержавеющей стали может быть значительным фактором, который сдерживает широкое внедрение подобных конструкций в маломасштабные и средние проекты» [20].

Из-за этого было проведено сравнение разных сталей между собой, распределив достоинства и недостатки, и выбрать сталь для конструкции реактора для данной работы.

Корпус биореактора может быть изготовлен из углеродистой стали, который «представляет собой металлический сплав, в состав которого входят железо и углерод. В отличие от других видов стали, в углеродистых сталях минимально количество дополнительных компонентов.

Эти сплавы характеризуются содержанием углерода, которое может достигать 2,14%. При этом допустимые пределы содержания примесей выглядят следующим образом: кремний — до 1%, марганец — до 1%, сера — до 0,05% и фосфор — до 0,06%.

Углерод, присутствующий в таком сплаве, придаёт стали уникальные свойства, включая повышенную твёрдость и прочность. Именно благодаря этим характеристикам углеродистая сталь находит широкое применение в строительстве, машиностроении и производстве различных деталей, требующих высокой долговечности и стойкости к механическим нагрузкам» [7].

«Углеродистые стали по качеству и назначению разделяют на стали конструкционные и инструментальные» [12].

По качеству (количеству вредных элементов – серы и фосфора) углеродистые конструкционные стали подразделяют:

- на стали обыкновенного качества;
- качественные углеродистые стали;

«Углеродистая сталь обыкновенного качества предназначена для изготовления проката горячекатаного: сортового, фасонного, толстолистного, тонколистового, широкополостного и холоднокатаного тонколистового, а также слитков, блюмов, слябов, сутунки, заготовок катаной и непрерывнолитой, труб, поковок и штамповок, ленты, проволоки, метизов» [8]. Но из этой стали изготавливают так же корпус для биореактора.

«К этой группе относятся стали, содержащие до 0,6% углерода при производстве которых обычно не предъявляются высокие требования к шихте, процессу плавки и разливки» [7]. Химический состав стали Ст3сп приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Химический состав стали (основные элементы)

Марка стали	Массовая доля химических элементов		
	углерода	марганца	кремния
Ст3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30

«Углеродистую сталь обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп,

Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп» [8].

Корпус биореактора может быть изготовлен из стали марки Ст3сп. В сталь марки Ст3сп допускается снижение нижнего предела массовой доли марганца на 0,10 % для тонколистового проката и толстолистового проката толщиной до 10 мм при условии обеспечения требуемого уровня механических свойств.

В стали марки Ст3сп, предназначенной для изготовления сортового и фасонного проката, кроме поставляемого для судостроения и вагоностроения, допускается снижение нижнего предела массовой доли марганца до 0,25 %, а нижний предел массовой доли углерода не нормируется при условии обеспечения требуемого уровня механических свойств

В стали, изготовленной скрап - процессом, допускается массовая доля меди до 0,40 %, хрома и никеля - до 0,35 % каждого. При этом в стали марок Ст3сп, массовая доля углерода должна быть не более 0,20 %.

Массовая доля серы в стали всех марок, кроме Ст0, должна быть не более 0,050 %, фосфора - не более 0,040 %. В стали марки Ст0 массовая доля серы должна быть не более 0,060 %, фосфора - не более 0,070 %» [ГОСТ 380-2005, Сталь углеродистая обыкновенного качества Марки, 2008.01.01, 16 с].

«Главными качественными признаками качественной углеродистой стали являются более жесткие требования по химическому составу и прежде всего по содержанию вредных примесей, таких как фосфора и серы. Ниже приведено предельное содержание фосфора и серы, % (не более), в сталях разной категории качества» [13].

Химический состав SA 516 Grade 65 приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав SA 516 Grade 65 [13]

Химический состав	Массовая доля, %
Углерод	0,08-0,20
Марганец	0,9-1,5
Кремний	0,4
Фосфор	0,03
Сера	0,03
Молибден	0,08
Никель	0,3
Медь	0,3

SA 516 Grade 65 – это углеродная сталь, которая в значительной степени применяется для производства сварных сосудов под давлением и котлов. Этот материал соответствует требованиям стандартов ASTM A516 и ASME SA516, которые устанавливают характеристики для стальных плит, предназначенных для работы при умеренных и низких температурах. Механические свойства приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Механические свойства SA 516 Grade 65 [13]

Механические свойства	Параметры
Прочность на разрыв	450-585 МПа
Предел текучести	Не менее 240 МПа
Удлинение	Не менее 23% для образца длиной 200 мм

Преимущества стали SA 516 Grade 65:

- сварка – сталь отличается хорошей свариваемостью, что делает её отличным выбором для использования в сварных конструкциях;
- устойчивость к низким температурам – сталь сохраняя свои механические свойства даже при низких температурах, она подходит для применения в холодных условиях.

Подводя итог по данной стали SA 516 Grade 65 является надежным вариантом для конструкций, которые нуждаются в высокой прочности и отличной свариваемости. Его использование охватывает множество отраслей, что делает его ключевым материалом в производстве сосудов под давлением и котлов.

Следовательно, углеродистые стали для изготовления биореактора использовать не желательно.

Так же корпус биореактора может быть изготовлен из легированной стали. «Легирование — добавление в состав материалов примесей для изменения (улучшения) физических и химических свойств основного материала. Легирование является обобщающим понятием ряда технологических процедур. В разных отраслях применяются разные технологии легирования.

В металлургии легирование производится введением в расплав или шихту дополнительных элементов (например, в сталь — хрома, никеля, молибдена, вольфрама, ванадия, ниобия, титана), улучшающих механические, физические и химические свойства сплава. Легирование проводится на различных этапах получения металлического материала с целями повышения качества металлургической продукции.

Примечательно то, что первыми сталями, с которыми познакомился человек были природнолегированные стали. Еще до начала железного века применялось метеоритное железо, содержащее до 8,5 % никеля. Высоко ценилось и природнолегированные стали, изготовленные из руд, изначально богатых легирующими элементами. Повышенная твердость и вязкость самурайских мечей с возможностью обеспечить остроту кромки возможно объясняются наличием в стали молибдена. Современные взгляды о влиянии на свойства стали различных химических элементов начали складываться с развитием химии во второй четверти XIX века.

Принято считать, что первой легированной сталью массового производства стала Сталь Гадфильда, открытая английским металлургом Робертом Эбботом Гадфильдом в 1882 г. Сталь содержит 1,0 — 1,5 % углерода и 12 — 14 % марганца, обладает хорошими литейными свойствами и износостойкостью. Без особых изменений химического состава эта сталь сохранилась до настоящего времени» [13]. Обозначения некоторых легирующих элементов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Обозначения некоторых легирующих элементов в стали [13]

А – азот	К – кобальт	Т – титан	Ю – алюминий А в конце – высококачественная (S, P ≤ 0,25%)
Б – ниобий	Н – никель	Ф – ванадий	
В – вольфрам	М – молибден	Х – хром	
Г – марганец	Р – бор	Ц – цирконий	
М – медь	С – кремний	Ч – редкоземельные	

Таблица 7 – Химический состав известных сталей по анализу ковшовой пробы [7]

Марка стали	Химический состав								
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	V
12ХН3А	0,09— 0,16	0,17— 0,37	0,30— 0,60	0,60— 0,90	2,75— 3,15	-	-	-	-
18ХГТ	0,17— 0,23	0,17— 0,37	0,80— 1,10	0,80— 1,10	-	-	-	0,030— 0,090	-
25ХГТ	0,22— 0,29	0,17— 0,37	0,80— 1,10	1,00— 1,30	-	-	-	0,030— 0,090	-
30ХГСА	0,32— 0,39	1,10— 1,40	0,80— 1,10	1,10— 1,40	-	-	-	-	-

«Основная масса легированных конструкционных сталей выплавляется качественными (содержание S, P ≤ 0,035%). Высококачественные стали

содержат меньше вредных примесей (не более 0,025% и 0,025% Р)» [7]. Химический состав сталей по анализу ковшевой пробы приведены в таблице 7.

Для получения высококачественного металла применяют различные способы обработки жидкого металла или переплава с целью удаления вредных примесей, газов, неметаллических включений, повышения однородности структуры» [7].

«Сталь 12ХН3А – это легированная конструкционная сталь высокого качества, предназначенная для процессов цементации, закалки и отпуска. Цементация, представляющая собой насыщение поверхностного слоя углеродом, позволяет достичь высокой твердости и износостойкости поверхности детали, в то время как сердцевина сохраняет отличную вязкость и прочность на сжатие» [10]. Благодаря столь гармоничному сочетанию характеристик, сталь 12ХН3А пользуется большой популярностью в производстве деталей, работающих в условиях значительных механических нагрузок. Она идеально подходит для эксплуатации в тяжелых условиях, где необходима надежная защита от износа и ударных воздействий, что делает ее незаменимым материалом в различных отраслях, таких как машиностроение, авиация и нефтегазовая промышленность.

Сталь 18 ХГТ – представляет собой легированную хромо-марганцевую конструкционную сталь, используемую для производства деталей ответственного назначения, которые требуют увеличенной прочности и вязкости сердцевины, а также высокой твердости поверхности. Эти детали предназначены для работы в условиях ударных нагрузок, например:

- шестерни полуосей и коробок передач;
- сателлиты;
- кулачки шарнира переднего ведущего моста;
- втулки;
- червячные валы;

- кулачковые муфты;
- пальцы;
- конические кольца подшипников диаметром 60-250 мм;
- ролики диаметром до 25 мм.

«Сталь 25ХГТ – это легированная конструкционная сталь, предназначенная для деталей, которые подлежат цементации, закалке и отпуску. Она является усовершенствованной версией 20ХГТ благодаря повышенному содержанию углерода, что способствует увеличению прочности и твердости» [1]. Сталь обладает хорошей прокаливаемостью, что делает её подходящей для изготовления средних и крупных деталей, работающих при высоких нагрузках и значительном трении. Введение титана улучшает структуру и характеристики стали, используется для изготовления:

Зубчатых колес и шестерен: Средних и больших размеров, для тяжелонагруженных передач.

- кулачковых валов: Для мощных двигателей;
- валов и осей: Подвергающихся высоким нагрузкам;
- поршневых пальцев;
- колец подшипников.

Других цементуемых деталей, требующих высокой поверхностной твердости, износостойкости, хорошей прокаливаемости и прочной сердцевины.

Сталь 30ХГСА – Один из самых популярных в промышленности и почти легендарный сплав, который вошёл в историю как прорывной на момент своего открытия. Этот материал был разработан перед началом войны учеными И.И. Сидориным и Г.В. Акимовым из ВИАМ (Всесоюзный Институт Авиационных Материалов). Сталь 30ХГСА на протяжении нескольких лет стала мировым лидером среди материалов в авиастроении и эффективно использовалась советской авиацией в военное время. По сей день сталь 30ХГСА находит применение в авиастроении, машиностроении,

кораблестроении и в множестве других отраслей как гражданской, так и военной промышленности.

Материал 30ХГСА поставляется в следующих видах:

- сортовой прокат;
- фасонный прокат;
- калиброванный пруток;
- шлифованный пруток;
- серебрянка;
- лист толстый;
- лист тонкий;
- полоса;
- поковки;
- кованные заготовки;
- трубы.

Таким образом, корпус биореактора, может быть изготовлен из легированных сталей.

Есть более известные стали для производства корпуса биореактора – это высоколегированные стали. Сталь 08Х18Н10Т представляет собой высоколегированную нержавеющей сталь, принадлежащую к аустенитной группе. Она характеризуется высокой стойкостью к коррозии и жаропрочностью, что делает её востребованной в различных сферах промышленности.

Элементы в таблице 8 обеспечивают ее устойчивость к коррозии и высокую прочность при высоких температурах. Физические свойства приведены в таблице 9.

Таблица 8 – Химический состав стали 08X18H10T [5]

Химический состав	Массовая доля, %
Углерод	До 0,08
Хром	17-19
Никель	9-11
Титан	До 0,7

Таблица 9 – Физические свойства стали 08X18H10T [5]

Физические свойства	Параметры
Плотность	7900 кг/м ³
Модуль упругости	196 ГПа
Коэффициент линейного расширения	16.1-18.2·10 ⁻⁶ 1/°С в зависимости от температуры

«Сталь марки 15X2НМФА представляет собой высоколегированную конструкционную сталь, которая находит широкое применение в различных отраслях, особенно в сфере атомной энергетики» [3].

Основные характеристики и область применения

-Состав: Сталь 15X2НМФА включает углерод (около 0,12%), хром (примерно 2,8%), молибден (около 0,8%) и ванадий (около 0,2%). Эти легировочные компоненты обеспечивают стали выдающиеся прочностные характеристики и стойкость к коррозии.

-Применение: Данная сталь находит основное применение в производстве корпусов и крышек для реакторов атомных электростанций (АЭС), а также в изготовлении поковок, листов и штампованных заготовок. Сталь 15X2НМФА используется при конструкциях активной зоны реакторов, что требует высокой прочности и надежности.

-Долговечность: Корпуса, созданные из стали 15Х2НМФА, разрабатываются с расчетом на срок службы до 100 лет, что делает их идеальными для эксплуатации в условиях, требующих высокой надежности и долговечности.

Делая общий вывод по высоколегированным сталям, изготовить корпус для реактора желательно.

«Алюминиевый сплав – покрытие, которое часто применяются для увеличения коррозионной стойкости, могут быть получены с использованием метода горячего цинкования, в частности для стали с алюминиевым защитным слоем. Это покрытие обеспечивает защиту основной стали от коррозии и способствует продлению срока службы изделий» [14].

«Алюминий известен своей способностью образовывать прочную оксидную пленку, это делает данный металл коррозионностойким. Алюминий стоек к воздействию серы. При этом Al образует сплавы со многими металлами. Аппараты, изготовленные из алюминия, не могут работать под давлением, из-за низкой прочности элемента. Это ограничивает применение алюминия» [14].

«Стоит обратить внимание, что содержание Al ниже определенного уровня повышает физико-механические свойства стали. Так, при содержании алюминия менее 0.002% ухудшает свойства. При содержании Al в стали 0.02–0.7% – подавляется процесс старения стали» [6].

«При высоких температурах на поверхности сталей образуются окислы железа, которые являются хрупкими и непрочными. При повышении температуры процессы образования окалин усиливаются. Окарины увеличивают расход металла. Легирование сталей алюминием позволяет увеличить окалинотойкость»[4].

«Алюминий в сплавах также приводит к отрицательным свойствам: есть вероятность образования оксидов алюминия. Соединение алюминия с кислородом образует Al_2O_3 , являющийся концентратором напряжений при

последующей переработке в метизном производстве. Повышение концентрации алюминия ухудшает качество поверхности холоднокатаных полос. Эти негативные свойства могут частично нейтрализоваться добавлением кальциевой проволоки (FeCa)» [18].

«Рассмотрим примеры марок сталей, легированных алюминием. Для современной промышленности важна способность сталей длительное время эксплуатироваться под напряжением при высоких температурах. Термостойкие стали производятся на основе железа с добавлением легирующих элементов, среди которых алюминий. Этот сплав характеризуется прочной кристаллической решеткой и позволяет существенно улучшить мелкозернистую структуру, что расширяет диапазон температур эксплуатации. При продолжительном воздействии высокой температуры сталь, основной компонент которой – железо, начинает окисляться. Легирование алюминием помогает предотвратить этот процесс» [24]. Физические свойства алюминия приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Физические и механические свойства [24]

Свойства	Титан
Атомная номер	22
Атомная масса	47,00
Плотность при 20°C, г/см ³	4,505
Температура плавления, °C	1668
Температура кипения, °C	3260
Скрытая теплота плавления, Дж/г	358
Скрытая теплота испарения, кДж/г	8,97
Теплота плавления, кДж/моль	18,8
Теплота испарения, кДж/моль	422,6
Молярный объем, см ³ /моль	10,6
Удельная теплоемкость при 20°C, кДж/(кг °C)	0,54
Удельная теплопроводность при 20°C, Вт/(мК)	18,85

Продолжение таблицы 10

Свойства	Титан
Коэффициент линейного термического расширения при 25°C, 10^{-6} м/мК	8,15
Удельное электросопротивление при 20°C, Омсм 10^{-6}	45
Модуль нормальной упругости, ГПа	112
Модуль сдвига, ГПа	41
Коэффициент Пуассона	0,32
Твердость, НВ	130...150
Цвет искры	Ослепительно-белый, длинный, насыщенный пучок искр
Группа металлов	Тугоплавкий, легкий металл

«Примерами термостойких сталей, содержащих алюминий, могут служить: 1Х13Ю4, 05Х27Ю5, 15Х6СЮ, Х18СЮ, Х6СЮ, ХН35ВТЮ» [24].

«Какой металл обладает одновременно и прочностью, и легкостью? Конечно же, титан. Выдерживающий многие агрессивные среды, низкие и высокие температуры, титан лишь в XX в. Оправдал свое название. Он занимает особое место среди металлов. Последующее использование стали начали применять для изготовления корпусов для реакторов» [24].

«Титан – элемент четвертой группы периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева с порядковым номером 22. Это металл серебристо-белого цвета, внешне схож со сталью. Существует в двух модификациях: - α -Ti с ГПУ (гексагональная плотноупакованная решётка), существует до 882,5°C. Плотность α -Ti – 4,505 (при 20 °C) . – β -Ti с ОЦК (объёмно-центрированная кубическая), существует от 882,5°C – до температуры плавления. Плотность β -Ti – 4,32 (при 900 °C)» [21]. Химический состав стали Ti (BT1-00) приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Химический состав Ti (BT1-00) [21]

Химические элементы	Процентное соотношение
Si	0,08

Продолжение таблицы 11

Химические элементы	Процентное соотношение
Fe	0,15
O	0,10
H	0,008
N	0,04
C	0,05

«Температура плавления порядка $1660 \pm 20^\circ\text{C}$. Более 100 лет после его открытия химикам не удавалось получать Ti в чистом виде, поэтому они не сразу узнали о том, что титан самый прочный в природе металл. В нынешнее время титан занимает 9 место по распространенности химических элементов. Титан обладает высокой механической прочностью даже при высоких температурах. Имеет высокую вязкость. В нормальных условиях поверхность титана покрывается оксидной пленкой. Это дает еще одно прекрасное свойство – коррозионостойкость. Наиболее заметное повышение коррозионной стойкости титана заметно при повышении содержания воды в агрессивной среде с 0,5 до 8,0%» [16].

В основном корпуса реакторов изготавливают из сталей и сплавов, но их изготавливают так же из полиуретана. Полиуретан (ПУ) представляет собой значимый материал для множества промышленных задач, включая изготовление корпусов биореакторов. Этот синтетический полимер имеет особые характеристики, благодаря которым он идеально подходит для применения в высокотехнологичных устройствах.

Характеристики полиуретана:

- сопротивляемость химическим веществам: Полиуретан обладает высокой стойкостью к различным химикатам, включая масла, щелочи и кислоты. Это свойство особенно важно для биореакторов, где могут использоваться агрессивные среды;

- температурная устойчивость: Полиуретан способен функционировать в широком диапазоне температур, что делает его подходящим для условий работы биореакторов;

- гибкость и прочность: Полиуретановые материалы можно производить с разной степенью твердости, что позволяет подстраивать их под конкретные требования конструкции биореактора, обеспечивая тем самым долговечность и надежность оборудования.

Полиуретан применяется для производства различных элементов биореакторов, таких как уплотнения и изоляционные материалы. Например, в процессе обновления оборудования традиционные резиновые уплотнительные кольца заменяются полиуретановыми, что существенно продлевает срок службы механизмов и уменьшает потребность в обслуживании, он является универсальным материалом, который широко используется в конструкции корпусов биореакторов благодаря своим выдающимся свойствам, таким как устойчивость к химическим воздействиям, термостойкость и способность адаптироваться к различным условиям эксплуатации. Создание биоразлагаемых вариантов полиуретана также открывает новые возможности для устойчивого производства в биотехнологической индустрии.

«Полиуретан не переносит продолжительное воздействие прямых солнечных лучей и большинства органических растворителей. Это может негативно сказаться на его механических свойствах и сроке службы, что является важным аспектом для корпусов биореакторов, которые могут подвергаться влиянию различных химических веществ и окружающей среды» [22]. Материалы на основе полиуретана, особенно в виде пен, обладают низкой проницаемостью и способны удерживать тепло и влагу. Это может создать неблагоприятные условия для микробиологических процессов, так как избыточная влага может привести к появлению плесени и другим нежелательным биологическим эффектам. Материалы на основе полиуретана

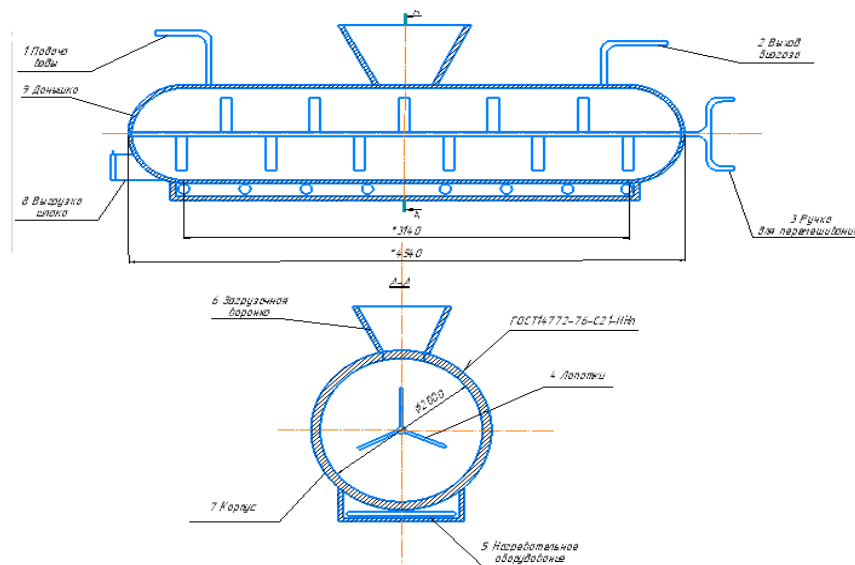
характеризуются высокой горючестью из-за их пористой структуры, что делает их менее безопасными для применения в биореакторах, где могут возникать высокие температуры и потенциальные источники возгорания. Кроме того, полиуретановые изделия сложно перерабатывать и часто не подлежат утилизации, что создает трудности в управлении отходами. Это становится важным аспектом для компаний, которые стремятся к устойчивому развитию и уменьшению своего экологического воздействия. Эластичные и прочные свойства полиуретана могут значительно варьироваться в зависимости от температуры, что может вызывать непредсказуемое поведение материала при температурных колебаниях, что критически важно для стабильной работы биореактора.

Делая вывод, Полиуретан обладает определенными преимуществами, такими как высокая механическая прочность и стойкость к износу. Однако его недостатки, включая невысокую устойчивость к химическим воздействиям, горючесть и трудности с переработкой, могут ограничивать его применение в качестве материала для корпусов биореакторов.

1.4 Описание конструкции предложенного биореактора

Биогазовая установка — это сварное устройство, разработанное для обработки отходов животноводства (рисунок 6). В его создании используется листовая материал толщиной 5 мм и трубка диаметром 5 мм, изготовленные из марки стали 08X18H10T. Размеры биологического реактора 2000×3140 мм.

Установка состоит из: выходной трубы 8 для биоудобрения, которая предназначена для вывода удобрения, полученного в результате биологического процесса; боковой части корпуса доннышко 9 биогазовой установки и обечайки корпуса 7, где происходит основной процесс биологического разложения биомассы с целью получения удобрения и биогаза.



- 1 – подача воды; 2 – выход биогаза; 3 – ручка для перемешивания; 4 – лопатки;
 5 – нагревательное оборудование; 6 – загрузочная воронка; 7 – корпус;
 8 – выгрузка шлама; 9 – доньшко

Рисунок 6 - Реактор

В горловине для накопления биогаза собирается и накапливается биогаз, который образуется в результате биологического разложения биомассы.

В конструкции предусмотрена труба для подачи воды 1 внутрь реактора, что способствует более эффективному сбраживанию отходов и повышает общую производительность системы.

Выходная труба 2 для биогаза предназначена для вывода собранного биогаза для его последующего использования.

Воронка для загрузки 6 отходов животноводства используется для загрузки начальной биомассы в установку.

Ручка мешалки 3 предназначена для перемешивания содержимого в установке, что способствует более равномерному биологическому процессу.

Лопатки 4 для перемешивания содержимого служат для интенсивного перемешивания биомассы в процессе биологического разложения.

Новым элементом, введённым в конструкцию, является нагревательное оборудование 5, которое способствует более эффективному производству

газа, улучшая температуру процесса и увеличивая выход энергетического ресурса.

Эти элементы работают в совокупности для обеспечения эффективного процесса биологического разложения биомассы с целью получения удобрения и биогаза.

1.5 Анализ возможных способов сварки корпуса биореактора

«Корпус биореактора может быть сварен с помощью ручной дуговой сварки (РДС), известной как сварка с покрытым электродом или ММА (Manual Metal Arc), является одним из распространённых методов соединения металлов, при котором электрод с покрытием создает электрическую дугу между собой и основным металлом. Этот метод позволяет осуществлять сварку различных материалов, включая углеродистые и нержавеющие стали, а также некоторые цветные металлы и сплавы» [23]. «В процессе сварки покрытый электрод расплавляется, образуя сварочную ванну, которая затем застывает, образуя прочный и надёжный шов. Благодаря своей простоте и универсальности, данный метод широко применяется в строительстве, ремонтных работах и производственных процессах. Кроме того, ручная дуговая сварка обеспечивает возможность выполнения сварных соединений в труднодоступных местах и на стыках различной сложности, что делает её незаменимой в многих сферах промышленности» [11].

Преимущества ручной дуговой сварки.

Доступность: Минимальные требования к оборудованию делают этот метод доступным для широкого круга пользователей. Гибкость: Позволяет соединять детали разной формы и размера, что особенно важно при выполнении сложных задач. Универсальность: Может применяться в любых пространственных позициях, что делает её незаменимой для работы в труднодоступных местах. Экономическая эффективность: Оборудование для

ММА сварки обычно стоит дешевле по сравнению с MIG или TIG, что снижает общие расходы на сварочные работы. Пользовательская простота: Не требует особого профессионального обучения, что позволяет быстро подготовить новых сварщиков к работе (рисунок 7).

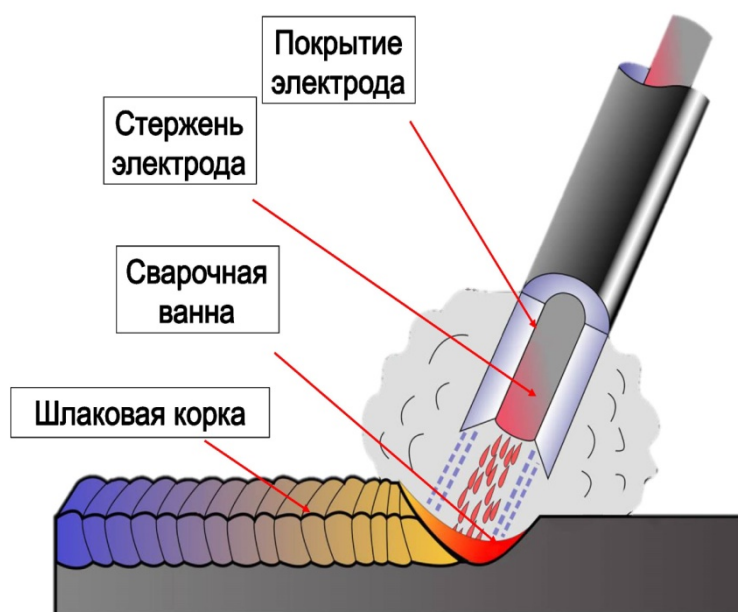


Рисунок 7 – Ручная дуговая сварка

Недостатки ручной дуговой сварки.

«Зависимость от квалификации сварщика: Качество сварного шва во многом зависит от умения и опыта сварщика, что может привести к несоответствию установленным стандартам. Низкая производительность: Этот метод часто менее быстрый по сравнению с автоматизированными способами сварки, что увеличивает сроки выполнения работ. Выделение вредных веществ и дыма: В процессе сварки выделяются дым и вредные пары, что требует соблюдения специальных мер безопасности и использования защитных средств» [2]. Ограниченные возможности при работе с толстыми металлами: Несмотря на универсальность ММА-сварки для различных

металлов, при сварке очень толстых материалов она может оказаться менее эффективной.

Таким образом, ручная дуговая сварка по-прежнему занимает важное место в практике сварочного дела и широко применяется благодаря своей универсальности и доступности. Этот метод обладает рядом преимуществ, таких как простота оборудования, универсальность и возможность выполнения сварочных работ в разнообразных условиях. Однако вместе с тем, он имеет и существенные недостатки, включая зависимость от квалификации сварщика, низкую производительность по сравнению с автоматизированными методами, а также риск воздействия вредных веществ и ограниченные возможности при работе с тонкими или очень толстым металлом. Поэтому при выборе метода сварки необходимо тщательно учитывать особенности конкретных задач и условий производства, чтобы оптимально сбалансировать эффективность, качество и безопасность выполняемых работ.

«Механизированная сварка плавящийся проволокой — это современный технологический процесс, основанный на использовании автоматизированных систем для выполнения сварочных работ, что обеспечивает существенное повышение эффективности, точности и качества получаемых соединений» [5]. Этот метод широко применяется в промышленных отраслях, где критически важны высокая точность, повторяемость и минимизация влияния человеческого фактора. В рамках механизированной сварки применяются различные технологии, такие как сварка в защитных газах, порошковая сварка, автоматическая сварка под флюсом и другие, позволяющие адаптировать процесс под специфические требования различных конструкций и условий эксплуатации. Благодаря этим технологиям достигается более стабильное качество швов, сокращаются сроки выполнения работ и повышается безопасность производства.

Преимущества.

Повышенная производительность: Использование механизированной сварки значительно сокращает сроки выполнения сварочных работ. Например, автоматизация подачи присадки может уменьшить продолжительность сварки в 3–5 раз. Повышенное качество: Такой процесс способствует высокой повторяемости и стабильности сварных швов, что помогает снизить процент дефектов и повысить надежность соединений. Особенно это важно для конструкций с высокой нагрузкой, таких как трубопроводы и резервуары.



Рисунок 8 – Механизированная сварка плавящимся электродом

Снижение рисков для здоровья: Механизация уменьшает объем ручных операций, что способствует уменьшению травматизма и улучшению условий труда сварщиков. Экономическая эффективность: Меньшее время на сварочные работы и снижение количества брака позволяют существенно снизить ресурсы и затраты (рисунок 8).

Недостатки.

Ограниченная универсальность: Оборудование для механизированной сварки зачастую создается под конкретные задачи, что снижает его

адаптивность к различным применению. Высокие начальные инвестиции: Стоимость приобретения механизированных систем довольно велика, что может стать препятствием для малых предприятий. Сложности в настройке и техническом обслуживании: Такие системы требуют квалифицированного персонала, а их обслуживание и настройка могут потребовать дополнительных затрат на обучение специалистов. Зависимость от окружающей среды: Внешние условия, такие как ветер и атмосферные осадки, могут негативно влиять на качество сварных соединений, особенно при использовании защитных газов.

Таким образом, механизированная плавящимся сварка является высокоэффективным методом, который, несмотря на определённые ограничения и сложности в использовании, широко применяется в различных промышленности благодаря своим преимуществам в скорости выполнения работ, обеспечении высокого качества швов и повышенной производительности. Этот метод позволяет значительно снизить трудозатраты и повысить стабильность сварных соединений, что делает его предпочтительным выбором для масштабных и ответственных проектов, а также способствует повышению общей эффективности производственного процесса.

«Аргонодуговая сварка, также называемая процессом TIG (Tungsten Inert Gas), является высокотехнологичным методом сварки, при котором используется инертный газ аргон для защиты сварочной дуги и сварного шва от воздействия атмосферных загрязнений, таких как кислород, влага и пыль. Этот способ обеспечивает создание прочных, чистых и идеально качественных сварных соединений благодаря точному контролю над процессом и отсутствию необходимости использования дополнительных присадочных материалов или минимальному их использованию» [26]. Метод широко применяется в промышленности с высокими требованиями к качеству и внешнему виду сварных швов, таких как аэрокосмическая, автомобильная,

ювелирная, а также в производстве сосудов под давлением и таких ответственных конструкциях. Благодаря своей универсальности и высокой точности, аргонодуговая сварка считается одним из наиболее предпочтительных методов для соединения легких металлов, таких как алюминий и титанов, а также для выполнения сложных и высокоточных работ, требующих минимальной деформации и максимальной чистоты сварных швов.

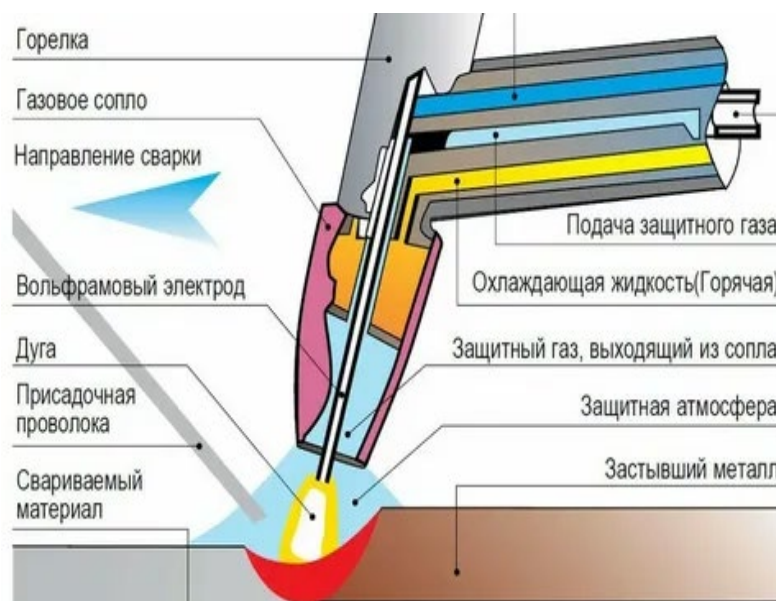


Рисунок 9 – Аргонодуговая сварка

«Преимущества аргонодуговой сварки включают следующее:

- Высокое качество соединения: Аргон создает устойчивую и инертную среду, что способствует предотвращению окисления и загрязнения шва, обеспечивая его чистоту и повышенную прочность.
- Многообразие применений: Этот метод подходит для сварки различных металлов, таких как алюминий, нержавеющая сталь, медь и титан, что делает его эффективным при работе с трудносвариваемыми материалами.
- Минимальные искажения: Благодаря низкому тепловому воздействию на детали, этот способ позволяет избежать их деформации, что особенно важно при работе с тонкими или сложными конструкциями (рисунок 9).

- Эстетичный результат: Аргонодуговая сварка дает аккуратный и ровный шов, зачастую не требующий последующей доработки» [25].

Недостатки аргонодуговой сварки. Высокая стоимость оборудования: Требуется специализированное оборудование, включая сварочные аппараты и газовые баллоны с аргоном, что увеличивает расходы. Низкая производительность при ручной сварке: Ручной процесс может быть менее эффективным по сравнению с другими методами, особенно при выполнении крупных объемов работ. Требования к квалификации сварщика: Необходимы определенные навыки и опыт для качественного выполнения сварки, что может стать препятствием для начинающих специалистов. Ограничения по условиям эксплуатации: Не рекомендуется использовать на открытом воздухе при сильных ветрах, поскольку это может вызвать утечку защитного газа и снизить качество шва.

Таким образом аргонодуговая сварка — это один из наиболее эффективных методов сварки, который, несмотря на наличие определенных недостатков, широко применяется благодаря своим существенным преимуществам в обеспечении высокого качества, прочности и надежности сварных соединений. Этот метод позволяет получать чистые и аккуратные швы, а также работать с разнообразными материалами, что делает его незаменимым в различных отраслях промышленности, особенно там, где важна точность и долговечность. Помимо этого, аргонодуговая сварка обладает высокой универсальностью, что позволяет использовать ее как для автоматизации, так и для ручных операций, а также обеспечивает снижение затрат времени и постобработки.

«Автоматическая сварка под флюсом (SAW) — это передовой и очень эффективный метод соединения металлов, основанный на использовании электрической дуги, которая защищена специальным слоем флюса. Этот процесс отличается высокой производительностью, что делает его идеальным для реализации крупномасштабных и массовых работ» [26]. Кроме того,

сварка под флюсом обеспечивает высокое качество и прочность сварных швов, а также обладает хорошими характеристиками по проникновению и стабильности процесса. Благодаря автоматизированному характеру и высокой точности, этот метод широко применяется в судостроении, тяжелом машиностроении, строительстве и в производстве трубопроводов. Кроме того, использование флюса в процессе уменьшает количество дефектов и способствует получению чистых, ровных швов с минимальной необходимостью последующей обработки.

Преимущества автоматической сварки под флюсом включают следующие аспекты. Повышенная производительность: автоматизация процесса позволяет значительно ускорить выполнение сварочных работ, что особенно важно при массовом производстве. Скорость сварки достигает 80-150 м/ч, делая этот метод особенно эффективным для длинных швов. Глубокое проплавление: применение высоких токов способствует обеспечению значительной глубины проплавления, что повышает прочность сварных соединений. Минимальное разбрызгивание: процесс сварки под флюсом снижает количество разбрызгивания металла, что уменьшает потери материала и создает более комфортные условия для работников. Защита от внешних факторов: флюс формирует защитный газовый слой, препятствующий окислению и загрязнению шва, что способствует повышению его качества. Экономическая эффективность: шлаковая корка, образующаяся после сварки, легко удаляется и может быть использована повторно, что снижает потребление флюса.

Недостатки автоматической сварки под флюсом включают следующее:

«Ограниченная гибкость перемещения: данный метод преимущественно применяется в стационарных условиях, что усложняет выполнение работ в ограниченных пространствах или при сложных геометриях изделий. Необходимость тщательной подготовки: для получения качественного шва требуется предельная точность в подготовке и сборке деталей, что

увеличивает время настройки сварочного процесса» [26]. Сложности при монтаже: выполнение автоматической сварки в условиях монтажа может быть затруднено, особенно при необходимости ведения работ в вертикальных или горизонтальных положениях. Высокие затраты на оборудование: приобретение и эксплуатация автоматизированных сварочных систем требуют существенных финансовых вложений, что может создать препятствия для небольших компаний.

Автоматическая сварка под флюсом широко используется в различных областях промышленности, таких как судостроение, нефтегазовая отрасль, строительство и машиностроение, благодаря своим существенным преимуществам и высокой производительности.

Этот метод обеспечивает высокое качество сварных соединений, снижает режимы воздействия на оборудование и обеспечивает стабильность процесса при выполнении крупномасштабных работ. Кроме того, автоматическая сварка под флюсом способствует повышению безопасности труда, уменьшению времени выполнения работ и снижению операционных затрат. Благодаря универсальности и надежности, данный метод постоянно расширяет свое применение в современном производстве и инженерных решениях (рисунок 10).



Рисунок 10 – Сварка под флюсом

Подводя итог раздела, были рассмотрены несколько видов конструкций реакторов используемые в мире. Так же сам принцип работы реактора. По поводу материалов для корпуса реактора, был проведен анализ пару марок из ряда сталей и сплавов. Так же проведен анализ известных способов сварки. В ходе сделанного анализа можно сказать что выбор материала для корпуса данной работы был выбрана “Высоколегированная сталь марки 08X18H10T”, способ сварки выбрали аргонодуговую.

Таким образом, для достижения поставленной цели, т.е повышение эффективности выхода биогаза, необходимо решить следующие задачи:

- Разработать конструкцию биореактора;
- Выбрать материал для корпуса биореактора;
- Разработать технологический процесс сборки и сварки корпуса биореактора;
- Выбор оборудования для изготовления корпуса биореактора.

2 Технологический процесс сборки и сварки корпуса реактора

2.1 Выбор размера прокатного листа по ГОСТУ

Первым делом для начала технологического прогресса должен быть выбран прокатный лист с размером, шириной и длиной (мм), учитывая минимальные отходы и потери.

Был выбран нержавеющей высоколегированный лист марки 08X18H10T по ГОСТУ 19904-90 размерами: толщиной 5 мм, шириной 2000 мм и длиной 3500 мм (рисунок 11).

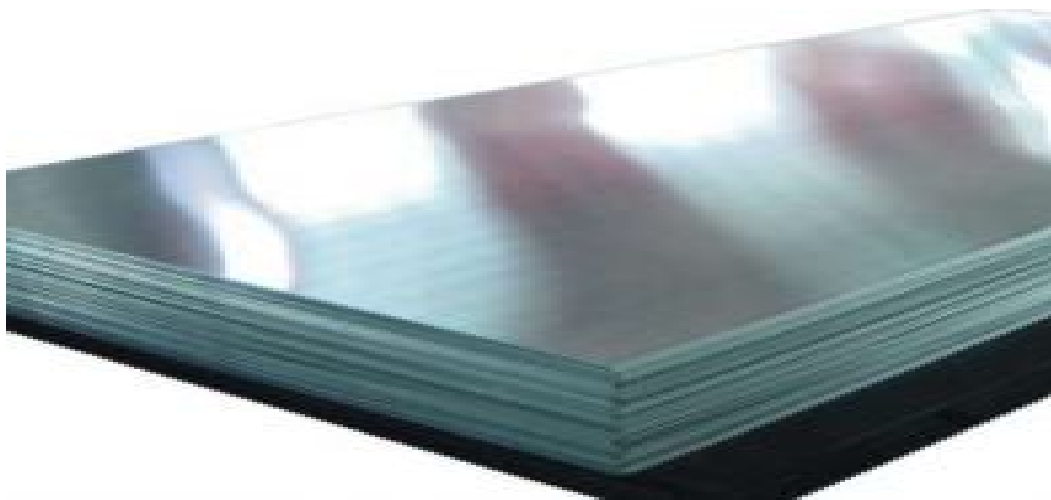


Рисунок 11 – Нержавеющий лист 08X18H10T

2.2 Разметка

Прежде чем приступить к разметке, следует удалить с поверхности мусор. Это гарантирует более надежное сцепление разметки с основанием и способствует её долговечности (рисунок 12).

Следующим шагом после очистки поверхности листа делаем разметку на поверхности точные размеры с помощью инструментами в ручную:

- чертилка;

- рулетка.

Размеры под корпус;

-ширина – 2000 мм;

-длина – 3140 мм.

С отклонением размеров не более 0,1 мм.



Рисунок 12 – Чертилка и рулетка

2.3 Резка

После разметки следующим процессом идет резка листа на нужные размеры корпуса реактора. Перед началом резки требуется подготовить прокатный лист. Это включает в себя удаление загрязнений и проверку на наличие дефектов, которые могут сказаться на качестве реза.

После того как подготовили заготовку и удалили загрязнения, вдобавок проверив на наличие дефектов подвозим лист к гильотине для рубки листового металла QC12K-6×2500 для нарезки заготовки для корпуса с отклонением не более 0,5 мм.

Вся длина стола составляет 2500 мм, подходит для фиксирования металлического листа перед резкой, так же максимальная толщина резки оборудования 6 мм которое соответствует толщине предложенного листа.

По окончании резки осуществили контроль качества заготовки. Измерили качество резки, проверку на наличие дефектов.

2.4 Гибка

Готовую заготовку после резки подготавливаем перед следующим шагом – это гибка. Нами используемое оборудование, это вальцы четырехвалковый электромеханический RME-2000х6мм. Перед началом гибки необходимо настроить вальцы оборудования под готовую заготовку:

- вальцы под толщину заготовки в 5мм (макс. 6мм).

Длина вальцов 2000 мм, без всяких неудобств металлический лист пройдет через гибки. Мощность данного оборудования 5,5 кВт, этой мощности хватит для гибки выбранной марки стали толщины.

Проконтролировать за процессом гибки и за параллельностью осей.

2.5 Сборка

После выполнения процессов подготовки корпуса необходимо установить заготовку на сварочный стенд для осуществления сварки. Существует множество типов таких стендов, но каждый завод выбирает свою модель по определённым причинам. В данной работе была использована установка для сварки продольных швов серии AWL FORCE UNIT. Она предназначена для стыковки и вращения труб во время сварки, которые применяются при строительстве нефтепроводов и газопроводов. Основной задачей этого оборудования является зафиксировать корпус в одном положении для достижения качественной сварки продольного шва.

Так же для фиксирования трубы были выбраны оправки для трубы и прижимы. Усилие прижимов 350Н. Перед сваркой сделать кромки не более 3 мм и зазор в стыке не более 2 мм.

2.6 Сварка

Закрепив корпус в одном положении, можно приступить к сварке шва. Для этой цели был выбран аппарат для аргонодуговой сварки Aurorapro INTER TIG 200 AC/DC PULSE. Важно, чтобы процесс сварки производился в одном непрерывном режиме, без остановок, чтобы обеспечить однородное качество шва на всем его протяжении. Это позволит избежать снятия напряжений и гарантирует, что сварной шов будет прочным и надежным, что особенно критично для конструкций, подверженных высоким нагрузкам. Также стоит обратить внимание на правильные настройки сварочного аппарата, такие как ток сварки, скорость подачи и угол наклона электрода, чтобы достичь оптимальных результатов (рисунок 13).

Режимы сварки:

- сила тока – 200А;
- скорость сварки – 8-12 м/ч;
- диаметр электрода – 4.

Отклонение параметров не более 10%.



Рисунок 13 - Сварочный аппарат аргонодуговая сварка Aurorapro
INTER TIG 200 AC/DC PULSE

Присадочная проволока для стали 08X18H10T используют два, смотря в какой окружающей среде будет находится шов и надо такие свойства дать:

-ER316L - содержит молибден, что повышает коррозионную стойкость и устойчивость к образованию трещин;

-ER308L - более универсальный вариант для соединений из нержавеющей сталей с примерно сходным химическим составом.

2.7 Контроль

Контроль шва после сварки включает несколько ключевых этапов, направленных на проверку качества выполненной сварки и выявление возможных дефектов (рисунок 14).

Визуальный осмотр - на первом этапе проводится тщательный визуальный осмотр сварного шва. Оценивается его внешний вид, однородность, отсутствие трещин, пор, неконтактных зон, а также правильность формы и размера шва. Важно убедиться, что шов имеет равномерную поверхность и нет признаков перегрева или недогрева.

Измерение геометрических параметров - проверяются размеры и геометрические параметры сварного шва, такие как высота, ширина и форма. Это можно сделать с помощью штангенциркуля или микрометра, чтобы убедиться, что шов соответствует установленным стандартам и чертежам.



Рисунок 14 – Инструменты для визуального и измерительного контроля

Устранение дефектов - если были выявлены какие-либо недостатки, необходимо разработать план их устранения, который может включать повторную сварку, механическую обработку или другие методы для восстановления качества шва.

После всех шагов контроля провести рентген сварного шва специальным оборудованием ПАМИР-300, 100%. Усиление шва до 3 мм. Так же не допустить обязательно трещин, наплывов и подрезы.

В заключение данного раздела был сформулирован технологический процесс для изготовления корпуса биореактора. Был тщательно подобран материал, обеспечивающий долговечность и стабильную работу оборудования на протяжении всего его эксплуатационного срока. Это позволит не только продлить срок службы биореактора, но и сохранить эффективность процесса производства биогаза, избегая каких-либо задержек или ухудшения качества в ходе его функционирования. Также необходимо учитывать влияние выбранных материалов на химическую устойчивость к

окружающей среде внутри реактора, что является ключевым фактором для успешной работы системы в долгосрочной перспективе.

2.8 Дополнительный источник тепла для поддержания температуры внутри биореактора

Сделав вывод из известных конструкций биореакторов, все они производили биогаз в тех температурах где был расположен сам биореактор без дополнительных источников тепла (рисунок 15).



Рисунок 15 – Тэн нагревательный

В данной конструкции было решено добавить дополнительный источник тепла для поддержания определенной температуры, чтоб процесс производства биологического газа был постоянный, качественным и эффективным. Взяв тэны чтоб установить их под корпусом для поддержания температуры.

Таким образом, разработанный технологический процесс позволит изготовить более качественную конструкцию биореактора.

3 Выбор оборудования для изготовления корпуса биореактора

3.1 Оборудования для резки

Для обеспечения высокого точности и качества изготовления корпуса биореактора необходимо выбрать оборудование, которое позволит избежать дефектов и погрешностей при обработке материала. Первым шагом после завершения разметки листа, который уже является металлическим, необходимо выбрать подходящее оборудование для резки, обеспечивающее прохождение всех размеченных размеров без препятствий. Было изучено множество вариантов, и наиболее подходящим оказался резак Euromet QC12K-6×2500 (рисунок 16).



Рисунок 16 - Гильотина для листового металла Euromet QC12K-6×2500

Данное оборудование в ширину – 2500 мм, без всяких преграждений и неудобств пройдет резку, и так же резка пройдет качественно и без дефектов. Гидравлические гильотинные ножницы QC12K предназначены для высококачественной резки металла. Их рама изготовлена из сварных листов и спроектирована для обеспечения высокой устойчивости к статическим и динамическим нагрузкам. Процесс резки на данных гильотинных ножницах основан на принципе «качающейся балки»: верхняя ножевка закреплена на балке, которая движется по дуговой траектории. Опускание режущей балки осуществляется с помощью системы из двух гидроцилиндров, распределительных клапанов и насосной станции. Обратное возвратное движение ножа происходит за счет давления азота в гидравлических цилиндрах. Гидравлические гильотинные ножницы, оснащённые системой гидравлических прижимов, обеспечивают точное позиционирование металлического листа перед резом. Параметры и значения оборудования приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Параметры и значения гильотины Euromet QC12K-6×2500 [25]

Параметры	Значения
Модель	QC12Y-6x2500
Толщина, мм	6
Ширина, мм	2500
Кол-во резов, мин	=>16
Угол ножа, град	1.3
Ход заднего упора, мм	20-600
Мощность, кВт	7.5
Габаритные размеры, мм	3150x1500x1600

В рабочем столе гильотинных ножниц встроены опорные пластины с шариковыми направляющими, что облегчает подачу листа в зону резки. По

желанию заказчика, эти ножницы могут быть дополнительно оснащены наклонным скатом для заготовок и системой резки металла под углом.

Несмотря на относительно невысокую цену, гидравлические гильотинные ножницы QC12K отличаются высоким качеством и высокой производительностью, что делает их популярным выбором среди покупателей. По данным параметрам, работать с оборудованием будет удобней и эффективней.

3.2 Оборудования для гибки

После резки металлического листа, с помощью роликов подводим разрезанный лист к оборудованию для гибки в форму трубы. Рассмотрев несколько оборудований и подходящий оказался четырехвалковый электромеханический RME-2000х6мм (рисунок 17).

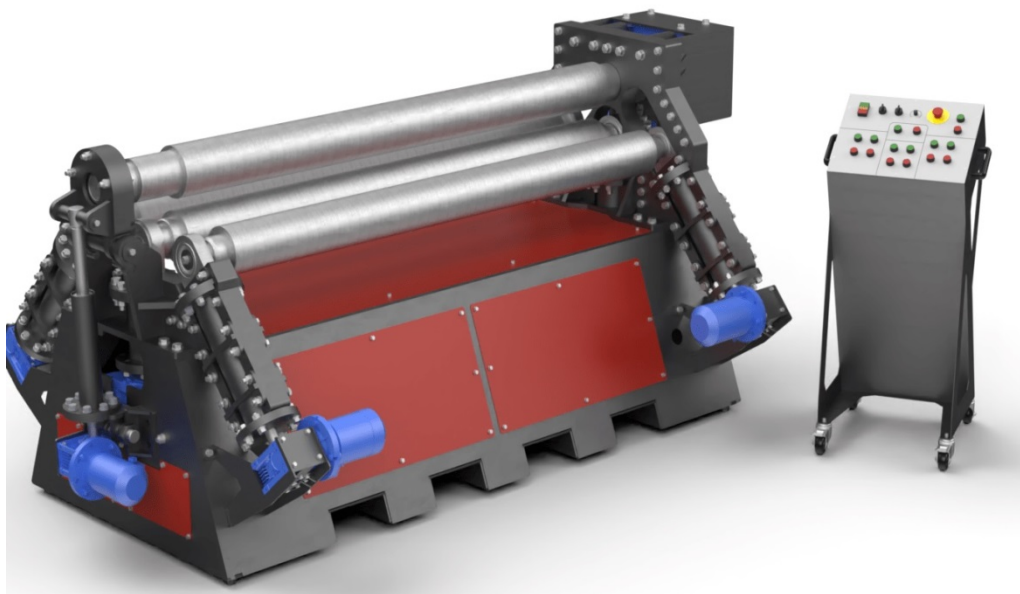


Рисунок 17 - Четырехвалковые электромеханические вальцы RME-2000х6мм

Четырехвалковые станки широко используются в промышленном и мелкосерийном производстве для изготовления емкостей, конусных деталей,

труб и других радиусных компонентов из листовой стали методом холодной гибки. Это особенно важно при производстве деталей с строгими требованиями к точности и высокой скоростью обработки. В зависимости от модели и комплектации, такие станки могут гнуть листовые материалы различных марок толщиной до 10 мм и длиной до 2000 мм, что делает их универсальным и мощным инструментом для реализации самых разнообразных производственных задач. Технические параметры приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Технические параметры и значения четырехвалковых электромеханических вальцов RME-2000x6мм [25]

Параметры	Значения
Размеры оборудования	3105x1770x1505, см
Твердость термообработки	От 28 единиц HRC (по Роквеллу)
Макс. толщина металла	6, мм
Мин. толщина металла	1, мм
Вес станка	3400, кг
Скорость привода подъема нижнего вала	23,3
Скорость привода подъема верхнего (бокового) вала	45, мин
Скорость вращения главного привода (об/мин)	23

Рассмотрев все характеристики оборудования, даст гарантию высокого качества и эффективности производства.

3.3 Стенд для сварки и сборки корпуса биореактора

Дав форму трубы для металлического листа, так же на специальном передвижном рельсах устанавливаем и фиксируем на сборочный и сварочный стенд AWL FORCE UNIT для сварки продольных швов (рисунок 18).



Рисунок 18 - Стенд для сварки и сборки серии AWL

Таблица 14 - Параметры и значения стенда для сварки и сборки AWL FORCE UNIT [25]

Параметры	Значения
Максимальная длина заготовки	2050, мм
Макс. диаметр заготовки	1200, мм
Толщина материала макс.	6, мм
Скорость сварки	3 – 12, м/мин
Масса	740, кг

Установки серии AWL — современные автоматические машины, предназначенные для сварки продольных швов тонколистовых материалов. Их конструкция является передовой и характеризуется высокими точностными допусками, что обеспечивает исключительное качество и точность изготовленных изделий. Параметры станда приведены в таблице 14.

Заготовка закрепляется на металлической оправке с помощью пневматических прижимов, управляемых рычагами. Оправка в месте контакта оснащена медными сегментами, расположенными по периметру поперек, для отвода тепла, возникающего в процессе сварки. Сегменты имеют пазы, позволяющие оператору правильно позиционировать заготовку в зависимости от толщины и типа материала. Все перемещения управляются пневматическими системами. Плавное и точное перемещение суппорта сварочной горелки осуществляется шаговым двигателем в диапазоне скоростей от 100 до 3 000 мм/мин. Маршевая скорость составляет 5 000 мм/мин, что значительно сокращает время возврата горелки в начальную позицию для следующего сварочного цикла. Стенд очень удобен и эффективен для сварки продольных швов.

Выбранное оборудование позволит выполнить все операции разработанного технологического процесса.

Заключение

Люди содержащие крупное стадо животных, сталкиваются с серьезной проблемой, связанной с большим объемом отходов животноводства, занимающих значительные площади и ухудшающие экологию. Чтобы справиться с этими отходами, большинство владельцев крупных стад животных нанимают специальный транспорт для уборки отходов, тратя при этом средства, которые не приносят дохода. Однако некоторые из них инвестируют в установки для производства биогаза, но не в промышленных масштабах, а лишь для обработки собственного объема отходов.

Рассмотрев несколько видов конструкций и сделав анализ используемых материалов для корпусов биореакторов, было выявлено, что все они имеют недостатки считая, что они не быстро и не очень эффективно отдают газ. Был выбран материал для долгой эксплуатации корпуса и более устойчивый к агрессивным средам как внутри реактора, так и снаружи, а так же, для экономии средств на материал.

Так же разработан собственный технологический процесс производства корпуса для биореактора, для эффективности работы биогазовой установки. Целью которой было повышение эффективного выхода биогаза биореактора, рассмотрев виды конструкций и про анализируя преимущества и недостатки материалов, предложена данная установка, которая может быть использована как в личных целях, так и в промышленных масштабах.

Проведен анализ возможных способов сварки корпуса биореактора и предложена аргонодуговая.

В результате разработанной конструкции корпуса биореактора и технологического процесса по изготовлению корпуса биореактора, за счет добавки воды в смесь и подогрева смеси, повышается скорость реакции, что сокращает время сбраживания и выход газа, а также повысится эффективность процесса, что и являлось целью работы.

Список используемых источников

1. Астащенко В.И., Швеёв А.И., Швеёва Т.В., and Халиков И.Н.. "Перспективные стали для тяжело нагруженных деталей автомобиля" Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2013, С. 212-218
2. Арутюнов Юрий Артемович, Балашова Светлана Александровна, Чашина Елена Евгеньевна, Шеманаева Людмила Ивановна Ручная дуговая сварка тонколистового металла // Вестник евразийской науки. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ruchnaya-dugovaya-svarka-tonkolistovogo-metalla>
3. Бакланов Виктор Владимирович, Градобоев Александр Васильевич, Скаков Мажын Канапинович, and Кукушкин Иван Михайлович. "Исследование структуры зоны взаимодействия прототипа кориума со сталью 15Х2НМФА" Ползуновский вестник, 2017, С. 134-137
4. Бойцов В. В. Горячая штамповка, Москва, 1978г. 44 с
5. Брот К. А., Сорвачев И. А., Семичева Л. Г. Преимущества и недостатки механизированной сварки порошковой проволокой // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-mehanizirovannoy-svarki-poroshkovoy-provolokoy>
6. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. – 544 с
7. Г.В Клевцов, М.А. Выбойщик, Н.А. Клевцова, Л.И. Попова., Материаловедение, 2018 г, 224 с
8. ГОСТ 380-2005, Сталь углеродистая обыкновенного качества Марки, 2008.01.01, 16 с
9. Дорф Валерий Анатольевич, Пергаменщик Борис Климентьевич. Совершенствование технологии устройства сухой защиты шахты реактора АЭС // Вестник МГСУ URL: 5. Шаманин Игорь Владимирович, Гаврилов Петр Михайлович, Беденко Сергей Владимирович, Мартынов Владимир Васильевич, Павлюк Александр Олегович, и др. Динамика накопления и спада наведенной

активности в элементах конструкции контейнера при хранении облученного ядерного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-nakopleniya-i-spada-navedennoy-aktivnosti-v-elementah-konstruktsii-konteynera-pri-hranenii-obluchennogo-yadernogo-topliva>

2011 <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-ustroystva-suhoy-zaschity-shahty-reaktora-aes> 2021

10. Илюшин В.В., and Данилова Н.А.. "Термическая обработка крупногабаритных поковок из стали 12ХН3А, подвергающихся глубокой цементации" Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2008, С. 137-142

11. Ильященко Дмитрий Павлович Исследование процессов кинетики протекания металлургических процессов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами с различным энергетическим воздействием на каплю электродного металла при производстве изделий горно-шахтного оборудования // ГИАБ. 2012. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessov-kinetiki-protekaniya-metallurgicheskikh-protsessov-pri-ruchnoy-dugovoy-svarke-pokrytyimi-elektrodami-s>

12. Каназашвили И.Х., Бункин И.Ф. Каназашвили В.И. Строительные материалы и изд. Справочное пособие. Москва. Аделант, 2006

13. Коджаспиров Г.Е., Основы легирования стали, 263 с

14. Мельникова А. Я. Конструкционные материалы, их свойства и применение: учебное пособие/ Мельникова А. Я., Райский В. В. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2015. – 100с

15. Максимов И. В., Павелко В. И., Перевезенцев В. В., Трыков Е. Л. Метод выделения полезного сигнала для системы обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов в главном циркуляционном контуре реакторной установки с водо-водяным

энергетическим реактором // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение» URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-biologicheskoy-zaschity-superistochnika-ultraholodnyh-neytronov-dlya-reaktora-vvr-m> 2019

16. Никифоров В.М. Технология металлов и конструкционных материалов. Л: Машиностроение, 1987. 363 с

17. Онегин Михаил Сергеевич, Лямкин Виталий Александрович, Серебров Анатолий Павлович. Расчет биологической защиты суперисточника ультрахолодных нейтронов для реактора ВВР-М // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-biologicheskoy-zaschity-superistochnika-ultraholodnyh-neytronov-dlya-reaktora-vvr-m> 2019

18. Утепов Н. Н., Абдеев Р. Г. Решение по контролю гумировочного покрытия при полном диа гностировании резервуаров// Создание и модернизация технологий, материалов и аппара тов для инновационного развития экономики / Материалы Всероссийской научной кон ференции, посвященной 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Шайхуллы Чанбарисова. ответственный редактор Баннова А. В.. 2016. С. 167–168

19. Шубин И. Н., Попова А. А. Совершенствование аппаратурно-технологического оформления производства высокопористого углеродного материала // Известия высших учебных заведений. Машиностроение URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-apparurno-tehnologicheskogo-oformleniya-proizvodstva-vysokoporistogo-uglerodnogo-materiala> 2023

20. Шаманин Игорь Владимирович, Гаврилов Петр Михайлович, Беденко Сергей Владимирович, Мартынов Владимир Васильевич, Павлюк Александр Олегович, и др. Динамика накопления и спада наведенной активности в элементах конструкции контейнера при хранении облученного

ядерного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-nakopleniya-i-spada-navedennoy-aktivnosti-v-elementah-konstruktsii-konteynera-pri-hranenii-obluchennogo-yadernogo-topliva> 2011

21. Свойства, применение, марки и химический состав [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metotech.ru/titan-opisanie.htm?ysclid=mc4lsm2r8v967878620>

22. Aliénor Delavarde, Gaelle Savin, Paul Derkenne, Marine Boursier, Roberto Morales-Cerrada, Benjamin Nottelet, Julien Pinaud, Sylvain Caillol, Sustainable polyurethanes: toward new cutting-edge opportunities, Progress in Polymer Science, Volume 151, 2024

23. Abhijit Saha, Subhas Chandra Mondal, Multi-objective optimization of manual metal arc welding process parameters for nano-structured hardfacing material using hybrid approach, Measurement, Volume 102, 2017, Pages 80-89

24. J. Vivas, D. De-Castro, E. Altstadt, M. Houska, D. San-Martín, C. Capdevila, Design and high temperature behavior of novel heat resistant steels strengthened by high density of stable nanoprecipitates, Materials Science and Engineering: A, Volume 793, 2020

25. Ngoc Quang Trinh, Khoi Dang Le, Shinichi Tashiro, Tetsuo Suga, Shuji Sasakura, Kazuhiro Fukuda, Anthony B. Murphy, Hanh Van Bui, Manabu Tanaka, Optimization of metal transfer in rutile flux-cored arc welding through controlled CO₂ concentration in argon–CO₂ shielding gas, Journal of Manufacturing Processes, Volume 124, 2024, Pages 590-603

26. P. Murali, R. Gopi, Experimental investigation of tungsten inert gas welding (TIG) using Ar/Ar-CO₂ shielding gas on alloy steels, Materials Today: Proceedings, Volume 39, Part 1, 2021, Pages 812-817