

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра химии и химической технологии  
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология  
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая техноло-  
гия природных энергоносителей и углеродных материалов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Расчет установки получения биогаза из органических отходов и  
подготовки его до товарного качества

Исполнитель

студент группы 0107-об

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.С. Есьман

Руководитель

доцент, канд. хим. наук

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

С.А. Лескова

Консультант по безопасности  
жизнедеятельности

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

проф., док. хим. наук

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Т.А. Родина

Благовещенск 2024

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**З А Д А Н И Е**

К выпускной квалификационной работе студента Есьман Анастасии Сергеевны.

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества» утверждена Приказом от 17.04.2024 г №1016-УЧ
2. Срок сдачи студентом законченной работы 07.06.2024 г.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: поголовье КРС КФХ ИП Бибииков А.Д., с. Дмитриевка, Амурской области, влажность субстрата – 85 %, длительность сбраживания – 11 суток, режим брожения – мезофильный (35 °С), температура воздуха в холодный период года – минус 30 °С, состав биогаза:  $\text{CH}_4$  – 65 %,  $\text{CO}_2$  – 32 %,  $\text{N}_2$  – 1 %,  $\text{H}_2\text{S}$  – 2 %. Технологическая документация, нормативная документация, литературные данные.
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по процессу получения биогаза из органических отходов животного происхождения. Характеристика сырья и готовой продукции биогазовой установки. Описание технологической схемы установки получения биогаза. Материальный и тепловой балансы биогазовой установки. Технологический расчет реактора, когенератора. Безопасность и экологичность производства.
5. Перечень материалов графической части: Технологическая схема биогазовой установки.
6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Козырь А.В., канд. техн. наук, доцент; раздел «Безопасность и экологичность производства»
7. Дата выдачи задания 27.04.2024 г

Руководитель выпускной квалификационной работы: Лескова Светлана Анатольевна, доцент, канд. хим. наук

Задание принял к исполнению 27.04.2024 г. \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 69 с., 1 рисунок, 10 таблиц, 53 формулы, 30 источников.

БИОГАЗ, БИОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА, ОРГАНИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ, БИОКОНВЕРСИЯ, АНАЭРОБНОЕ БРОЖЕНИЕ, БИОРЕАКТОР, ФЕРМЕНТАЦИЯ, ОЧИСТКА БИОГАЗА, БИОМЕТАН, ГАЗГОЛЬДЕР, ЭФФЛЮЭНТ

Темой исследования является процесс получения биогаза методом биологической конверсии органических отходов животноводства.

В ходе выполнения бакалаврской работы проведен анализ литературных данных по технологии получения биогаза из органических отходов. Изучено сырье, рассмотрены основные этапы последовательного превращения вторичных органических ресурсов с образованием ценных продуктов – биогаза и биоудобрений. Приведены группы факторов, влияющих на выход продукта, процессы очистки от примесей и доведение до товарного качества.

В технологической части рассмотрена характеристика сырья и готовой продукции. Разработана технологическая схема получения биогаза. В результате на основе данных о численности крупного рогатого скота КФХ ИП Бибииков А.Д., расположенного в с. Дмитриевка Амурской области, рассчитаны количество субстрата, выход биогаза, тепловой и материальный балансы биогазовой установки, размеры основного оборудования – биореактора, когенератора.

					ВКР.319695.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	3	69
Н. Контр.	Родина Т.А.				АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об			
Утверд.	Гужель Ю.А.							

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- АПК – агропромышленный комплекс;  
 БГУ – биогазовая установка;  
 КРС – крупный рогатый скот;  
 КФК – крестьянское фермерское хозяйство;  
 МРС – малый рогатый скот;  
 ППЖ – побочные продукты животноводства.

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	4	69
Н. Контр.	Родина Т.А.					АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об		
Утверд.	Гужель Ю.А.							

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Литературный обзор	8
1.1 Биогаз и его применение в различных аспектах	8
1.2 Химические основы биоконверсии органических веществ	12
1.3 Параметры ведения процесса анаэробной ферментации	13
1.4 Биогазовое оборудование	18
1.5 Целевые продукты биогазовой установки	23
1.6 Подготовка биогаза до товарного качества	24
1.7 Очистка биогаза от воды, сероводорода, углекислого газа	26
1.8 Аккумуляция биогаза	32
2 Технологическая часть	33
2.1 Характеристика сырья и готовой продукции	33
2.2 Описание технологической схемы биогазовой установки	37
2.3 Расчет биогазовой установки	39
2.3.1 Расчет количества субстрата и выхода биогаза	39
2.3.2 Расчет размеров биореактора	43
2.3.3 Материальный баланс биогазовой установки	45
2.3.4 Тепловой баланс биогазовой установки	46
2.3.5 Расчет биогазового когенератора	55
3 Безопасность и экологичность производства	57
3.1 Требования безопасности биогазовой установки	60
3.2 Средства индивидуальной защиты обслуживающего персонала	63
Заключение	65
Библиографический список	66

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	5	69
Н. Контр.	Родина Т.А.				АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об			
Утверд.	Гужель Ю.А.							

## ВВЕДЕНИЕ

Биогаз является высококачественным и полноценным носителем энергии и может многосторонне использоваться в качестве топлива для производства электроэнергии, тепла, пара для отопления жилых и производственных помещений, автомобильного топлива.

В Амурской области существует перспектива переработки органических отходов в качестве источника биогаза, использование которого в виде энергоносителя частично снизит зависимость сельхозпроизводителей от поставщиков электрической энергии, а также уменьшит экологическую нагрузку на территории и позволит получить экологически чистые удобрения.

Актуальность внедрения биогазовой установки обусловлена следующими факторами:

1. Использование животноводческих отходов в качестве источника энергетического ресурса для получения товарного биогаза, электроэнергии и тепла является актуальной и экономически выгодной задачей.

2. Эффективная утилизация биологических отходов снижает выбросы метана в атмосферу, что приводит к сокращению выбросов парниковых газов и предотвращает глобальное потепление.

3. Для конкретных территорий внедрение биогазовой установки способствует сокращению количества отходов и объёмов их накопления, уменьшению местного загрязнения воздуха благодаря меньшему количеству вредных выбросов, сокращению содержания органических веществ в отходах и сточных водах, уменьшению использования химических удобрений.

4. Использование биогазовых технологий позволяет достичь экологической замкнутости производства, что является важнейшим условием перехода к экономике замкнутого цикла.

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Разраб.	Есьман А.С.					У	6	69
Пров.	Лескова С.А.							
Н. Контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.							
						АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об		

Согласно федеральному закону от 14 июля 2022 года № 248-ФЗ «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», биогазовые установки теперь входят в категорию решений, позволяющих использовать побочные продукты животноводства в качестве органических удобрений без необходимости получения лицензии на обращение с отходами. Это изменение позволяет снизить затраты на утилизацию этих продуктов и повышает эффективность использования ресурсов в сельском хозяйстве.

Целью выпускной квалификационной работы является расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести подбор и анализ научно-технической документации и литературы для составления литературного обзора по вопросам значения биогаза технологии анаэробной переработки вторичных ресурсов с целью получения биогаза и подготовки до товарного качества.

2. Разработать оптимальную технологическую схему установки получения биогаза, включая аппараты и оборудование, технологические параметры, особенности ведения процесса.

3. Произвести технологический расчёт биогазовой установки.

4. Рассмотреть аспекты производственной безопасности, опираясь на принятые в промышленной сфере требования к безопасной организации труда и организации рабочего места, санитарные нормы и правила.

5. Выполнить графическое изображение спроектированной установки в виде чертежа технологической схемы.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Биогаз и его применение в различных аспектах

Биогаз – смесь метана и углекислого газа, образующаяся в процессе анаэробного сбраживания в специальных реакторах – метантенках, устроенных и управляемых таким образом, чтобы обеспечить максимальное выделение метана [1]. В состав газа входят: от 50 % до 75 % метана, от 25 % до 50 % двуокиси углерода, от 2 % до 8 % водяного пара и следы  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$  [2].

Использование биогаза, биоудобрений даст снижение себестоимости животноводческой продукции примерно вдвое, а с учетом экологически безупречного качества превратит ее в конкурентоспособную с аналогичной продукцией на отечественном и мировом рынках.

Рыночная привлекательность биогазовой установки складывается из пяти главных аспектов: экономического; экологического; социального; энергетического; агрохимического [3].

*В энергетическом аспекте:*

– получение биогаза, производство экологически безопасной энергии.

*В агрохимическом аспекте:*

– получение экологически чистого органического удобрения.

*В экономическом аспекте:*

– замена дорогих минеральных удобрений на более дешевые и эффективные органоминеральные удобрения и повышение качества почвы позволяет при тех же затратах получить больше продуктов растениеводства и сформировать дешевую кормовую базу;

– возникает и формируется широкая сеть дешевой животноводческой продукции и сотрудничество на взаимовыгодных условиях;

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	8	69
Н. Контр.	Родина Т.А.					АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об		
Утверд.	Гужель Ю.А.							



- затраты на утилизацию навоза и отходов включают только расходы хозяйства на переработку;
- снизить затраты на производство кормов за счет уменьшения обработки почвы, закупки минеральных удобрений;
- уменьшение суммы штрафов за экологические нарушения, связанные с хранением и вывозкой навоза;
- снижение себестоимости продукции на животноводческих предприятиях.

*В экологическом аспекте:*

- полная утилизация отходов животноводства и растениеводства;
- уменьшение загрязнения окружающей среды и пахотных земель;
- оздоровление среды обитания в местах дислокации животноводческих предприятий;
- снижение загрязнения окружающей среды и борьба с глобальным потеплением;
- внедрение щадящих технологий обработки почвы, отказ от использования химических средств повышения урожайности;
- вовлечение в хозяйственный оборот животноводческих и растительных отходов сельхозпроизводства.

*В социальном аспекте:*

- увеличение занятости сельского населения в производительном труде;
- производство дополнительных объемов животноводческой продукции для продовольственного обеспечения;
- появление дополнительного источника доходов;
- совершенствование инфраструктуры, связи, экономической грамотности и коллективного взаимодействия, вызванное реализацией проекта;
- частичное решение проблемы безработицы;
- участие населения в активной производственной деятельности, приносящей хорошие доходы, должно сформировать новый тип менталитета сельско-

9					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

го населения [3].

Биогаз является практически точным аналогом природного газа, только искусственного происхождения. В таблице 1 представлен химический состав биогаза и природного газа [4].

Таблица 1 – Химический состав биогаза и природного газа

Компоненты	Биогаз анаэробной ферментации, %	Природный газ, %
Метан	50 – 85	83 – 98
Углекислый газ	15 – 50	0 – 14
Азот	0 – 1	0,6 – 2,7
Кислород	0,01 – 1	–
Водород	менее 1	–
Сероводород	менее 1	–
Аммиак	менее 1	–
Этан	–	до 11
Пропан	–	до 3

Сырьем для получения биогаза являются органические отходы предприятий АПК: ферм КРС, МРС, свинокомплексов, птицефабрик, сахарных и пивоваренных заводов, виноводочных производств, а также очистных сооружений.

Биогаз и природный газ имеют много общего, так как они оба используются для генерации электричества и отопления, и оба могут быть использованы в газовых двигателях или турбинах. Биогаз можно сравнить с другими видами энергетических ресурсов, в которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная энергетическая ценность биогаза

Вид топлива	Эквивалент
Биогаз (60 % CH <sub>4</sub> и 40 % CO <sub>2</sub> )	1 м <sup>3</sup>
Природный газ	0,6 м <sup>3</sup>
Нефть	0,74 л
Дизельное топливо	0,65 л
Бензин	0,48 л

Основное отличие между ними заключается в их происхождении. Природный газ образуется в земной коре в течение миллионов лет под воздействием высокого давления и температуры. Биогаз получается в результате анаэробного разложения органических материалов, таких как отходы сельского хозяйства или сельского хозяйства, очистных канализационных сооружений, мусорных полигонов и свалок.

Биогаз содержит меньше метана, чем природный газ, в его составе присутствуют углеводороды. Поэтому, хотя биогаз может быть использован в тех же устройствах, что и природный газ, он требует модификации оборудования для оптимизации его использования.

Биогаз считается более экологически чистым источником энергии, поскольку он сокращает количество отходов и уменьшает выбросы парниковых газов. Однако его производство требует значительных инвестиций и специализированного оборудования, что делает его менее экономически выгодным, чем добыча природного газа.

Биоконверсия побочных продуктов животноводства позволяет получить:

- разные виды энергоресурсов: тепловую энергию, газ, электроэнергию, моторное топливо;
- независимость от возрастающих тарифов и вероятных перебоев в поставках газа и электроэнергии;
- решение проблем утилизации органических отходов с выходом готовых продуктов: биометан, биогумус и минеральные удобрения.

Процесс производства биогаза приводит к уменьшению выбросов вредных отходов в окружающую среду, что благоприятно влияет на экологическую обстановку. Кроме выбросов метана накопление и неправильное хранение органических отходов приводит к загрязнению грунтовых вод, окислению почв и отчуждению аграрных территорий. Переработка отходов в биогаз и удобрения может решить эту проблему [5].

Использовать биогаз путем когенерации могут предприятия агрокомплекса или пищевой промышленности для собственного потребления.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В таком случае организация может выйти на уровень безотходного производства и энергетической независимости [6].

## 1.2 Химические основы биоконверсии органических веществ

В основе биогазовых технологий лежат сложные природные процессы биологического разложения органических веществ в анаэробных условиях под воздействием особых групп бактерий.

Анаэробное брожение происходит без доступа кислорода и представляет многоступенчатый процесс, включающий в себя ряд последовательных стадий: гидролиз сложных биополимерных молекул, кислотогенную, ацетогенную, метаногенную стадии [7].

В *первой фазе (гидролизная)* высокомолекулярные органические соединения сырья (целлюлоза, белки, жиры) расщепляются до низкомолекулярных соединений:

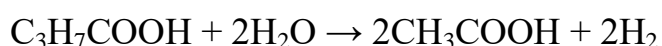
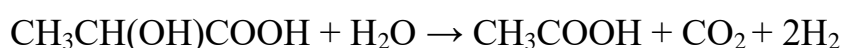
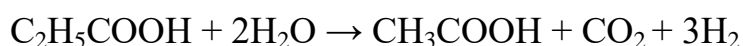
Полисахариды → олигосахариды → моносахариды

Белки → олигопептиды → дипептиды → аминокислоты

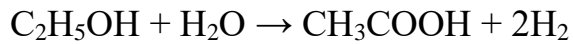
Липиды → глицерин + высшие жирные кислоты

Во *второй фазе (ацидогенная, кислотообразующая)* соединения разрушаются до органических кислот (муравьиной, уксусной, пропионовой, молочной, масляной и др.), спиртов (этилового, пропилового и др.), газов (диоксида углерода, водорода, сероводорода, аммиака), аминокислот, глицерина и др. Процесс осуществляют обычные сапротрофные анаэробные микроорганизмы (маслянокислые, молочнокислые, пропионовокислые бактерии и дрожжи) при pH среды от 4,5 до 7,0.

В *третьей фазе (ацетогенной) фазе* под воздействием ацетогенных бактерий из образованных кислот вырабатывается уксусная кислота. Летучие жирные кислоты и алкоголь превращаются в ацетат, водород, углекислый газ. Реакции проходят по следующим схемам:

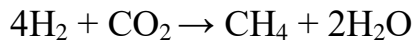
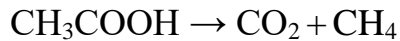


					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



*Четвертая фаза (метангенерация)* – заключительный этап брожения.

Уксусная кислота разлагается на метан, углекислый газ и воду. Водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду [7].



Характеристика метаногенов: строгие анаэробы, хемоавтотрофы или хемогетеротрофы, всегда образуют метан как продукт катаболизма. Источником углерода и энергии служат диоксид углерода, формиат, ацетат и соединения, содержащие метильную группу: метанол, метиламины, метилсульфиды, метанол, спирты. Источник азота – аммиак, некоторые штаммы могут использовать аминокислоты или фиксировать молекулярный азот. В природе существуют ассоциации водород- и метанобразующих микроорганизмов, например, в рубце жвачных животных [7].

### **1.3 Параметры ведения процесса анаэробной ферментации**

#### *Анаэробные условия в реакторе*

Жизнедеятельность метанобразующих бактерий возможна только при отсутствии кислорода в реакторе биогазовой установки, поэтому необходима герметичность реактора и наличие бескислородной среды.

#### *Температурный режим*

Поддержка оптимальной температуры является одним из важнейших факторов процесса сбраживания. В природных условиях процесс метангенерации происходит при температурах от 0 °С до 97 °С. С учетом оптимизации процесса переработки органических отходов с целью получения биогаза выделяют три температурных режима:

- психрофильный режим: от 20 °С до 25 °С (opt = 23 °С);
- мезофильный режим: от 25 °С до 40 °С (opt = от 36 °С до 38 °С);
- термофильный режим: свыше 40 °С (opt = от 52 °С до 55 °С).

К преимуществам термофильного режима ферментации относятся:

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

К преимуществам термофильного режима ферментации относятся: повышенная скорость разложения сырья; более высокий выход биогаза; практически полное уничтожение болезнетворных бактерий, содержащихся в сырье.

Недостатками термофильного режима ферментации являются: большое количество энергии, требуемое для подогрева сырья в реакторе, чувствительность процесса к минимальным изменениям температуры; более низкое качество получаемых биоудобрений [8].

При мезофильном режиме сбраживания сохраняется высокий аминокислотный состав биоудобрений; неполное обеззараживание сырья в сравнении с термофильным режимом.

#### *Пределы изменения температуры*

Процесс биометанации чувствителен к изменениям температуры. Допустимы изменения температуры в пределах:

- психрофильный режим:  $\pm 10$  °С;
- мезофильный режим:  $\pm 3 - 4$  °С;
- термофильный режим:  $\pm 0,5$  °С.

#### *Время сбраживания*

Оптимальное время сбраживания зависит от дозы загрузки реактора и температуры процесса сбраживания. Если время сбраживания выбрано слишком коротким, при выгрузке сброженной биомассы бактерии из реактора вымываются быстрее, чем могут размножиться и процесс ферментации практически останавливается.

Продолжительное выдерживание сырья в реакторе не отвечает задачам получения наибольшего количества биогаза и биоудобрений за определенный промежуток времени.

#### *Время оборота реактора*

Время оборота реактора – время, в течение которого свежее сырье, загруженное в реактор, перерабатывается и выгружается из него.

Для систем с непрерывной загрузкой среднее время сбраживания определяется отношением объема реактора к ежедневному объему загружаемого

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

сырья. На практике, время оборота реактора выбирают в зависимости от температуры сбраживания и состава сырья в следующих интервалах:

- психрофильный режим: от 30 до 40 и более суток;
- мезофильный режим: от 10 до 20 суток;
- термофильный режим: от 5 до 10 суток.

#### *Суточная доза загрузки сырья*

Суточная доза загрузки сырья определяется временем оборота реактора и увеличивается с увеличением температуры в реакторе [8]. Если время оборота реактора составляет 10 суток, то суточная доля загрузки будет составлять 1/10 общего объема загружаемого сырья. Для установок, работающих в термофильном режиме, доля загрузки может составить до 1/5 общего объема загрузки реактора [8].

#### *Время переработки сырья*

Выбор времени сбраживания зависит от типа перерабатываемого сырья. Для следующих видов сырья, перерабатываемого в условиях мезофильного температурного режима, время, за которое выделяется наибольшая часть биогаза, равно:

- отходы КРС: от 10 до 15 дней;
- отходы свинокомплекса: от 9 до 12 дней;
- отходы птицефабрик: от 10 до 15 дней;
- биомасса, смешанная с растительными отходами: от 40 до 80 дней.

#### *Кисотно-щелочной баланс*

В процессе метанового брожения второй этап производства биогаза является фазой активного действия кислотных бактерий. В это время уровень рН снижается, то есть среда становится более кислой.

При нормальном ходе процесса жизнедеятельность разных групп бактерий в реакторе проходит одинаково эффективно и кислоты перерабатываются метановыми бактериями. Оптимальное значение рН колеблется в зависимости от типа сырья от 6,5 до 8,5. Измерить уровень кислотно-щелочного баланса можно с помощью индикатора [8].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### *Питательные вещества*

Для жизнедеятельности метановых бактерий необходимо наличие в сырье органических и минеральных питательных веществ. В дополнение к углероду и водороду, создание биоудобрений требует достаточного количества азота, серы, фосфора, калия, кальция и магния и некоторого количества микроэлементов – железа, марганца, молибдена, цинка, кобальта, селена, вольфрама, никеля и других. Обычное органическое сырье – навоз животных содержит достаточное количество вышеупомянутых элементов.

### *Соотношение содержания углерода и азота*

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на метановое брожение, является соотношение углерода и азота в перерабатываемом сырье. Если соотношение C:N чрезмерно велико, то недостаток азота будет служить фактором, ограничивающим процесс метанового брожения. Если соотношение слишком мало, то образуется большое количество аммиака, что он становится токсичным для бактерий.

Микроорганизмы нуждаются как в азоте, так и в углероде для процессов ассимиляции. Выход биогаза наибольший при соотношении углерода и азота от 10 до 20, где оптимум колеблется в зависимости от типа сырья. Для достижения высокой продукции биогаза практикуется смешивание сырья для достижения оптимального соотношения C:N.

### *Оптимальная влажность сырья*

Беспрепятственный обмен веществ в сырье является предпосылкой для высокой активности бактерий. Это возможно в том случае, когда вязкость сырья допускает свободное движение бактерий и газовых пузырьков между жидкостью и содержащимися в ней твердыми веществами [9].

### *Твердые и сухие вещества в сырье*

Более легкие материалы поднимаются на поверхность сырья и образуют корку на его поверхности, приводящие к уменьшению газообразования. Поэтому рекомендуется тщательно измельчать перед загрузкой в реактор растительные остатки и стремиться к отсутствию твердых веществ в сырье.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Содержание сухих веществ определяются влажностью ППЖ. Влажность сырья, загружаемого в реактор установки, должна быть не менее 85 % в зимнее время и 92 % в летнее время года. Для достижения оптимальной влажности сырья навоз обычно разбавляют горячей водой в количестве, определяемом по формуле:

$$ОВ = Н \frac{В_1 - В_2}{100 - В_2},$$

где Н – количество загружаемых отходов;

В<sub>1</sub> – первоначальная влажность отходов;

В<sub>2</sub> – необходимая влажность сырья;

ОВ – количество воды в литрах [9].

#### *Регулярное перемешивание*

Для эффективной работы биогазовой установки и поддержания стабильности процесса сбраживания сырья внутри реактора, необходимо периодическое перемешивание. Перемешивание обеспечивает:

- высвобождение произведенного биогаза;
- использование свежего субстрата популяциями бактерий;
- предотвращение формирования корки и осадка;
- выравнивание температуры внутри реактора;
- обеспечение равномерного распределения популяции бактерий;
- предотвращение формирования пустот и скоплений, уменьшающих эффективную площадь реактора.

При выборе подходящего способа и метода перемешивания, нужно учитывать, что процесс сбраживания представляет собой симбиоз между различными штаммами бактерий, то есть бактерии одного вида могут питать другой вид. Когда сообщество разбивается, процесс ферментации будет непродуктивным до того, как образуется новое сообщество бактерий. Слишком частое или продолжительное и интенсивное перемешивание вредно. Рекомендуется медленно перемешивать сырье через каждые от 4 до 6 часов.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### *Ингибиторы процесса*

Солнечный свет оказывает бактериостатическое действие на развитие микроорганизмов, замедляя процессы их жизнедеятельности. Исключить влияние света можно с помощью светонепроницаемой крышки [10].

Сбраживаемая органическая масса не должна содержать веществ (антибиотики, растворители), отрицательно влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов. Верхний предел наиболее распространенных неорганических веществ приведен в таблице 3 [10].

Таблица 3 – Вещества, ограничивающие рост бактерий

Ингибиторы роста бактерий	Концентрация выше, мг/л
Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ )	2500 – 4500
Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	200
Медь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	100
Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )	1000 – 1500
Марганец ( $\text{Mn}^{2+}$ )	1500
Никель ( $\text{Ni}^{3+}$ )	200 – 500
Нитрат ( $\text{NO}_3^-$ , рассчитанный как N)	0,05
Калий ( $\text{K}^+$ )	2500 – 4500
Натрий ( $\text{Na}^+$ )	3500 – 5000
Хлорид натрия ( $\text{NaCl}$ )	40,000 ppm (в весовом отношении)
Сульфат ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	5,000 ppm (в весовом отношении)

### **1.4 Биогазовое оборудование**

Биогазовая станция – комплекс сложных инженерных сооружений, состоящий из устройств подготовки сырья, производства биогаза и удобрений, очистки и хранения биогаза, производства электроэнергии и тепла, автоматизированной системы управления. Во всем мире биогазовые установки используются давно и эффективно.

Биогазовая установка сконструирована таким образом, чтобы обеспечить оптимальные условия для производства биогаза. В ее составе можно выделить несколько последовательных комплексов:

– комплекс подготовки сырья;

- комплекс анаэробного сбраживания;
- комплекс автоматизации;
- комплекс сбора и очистки биогаза;
- комплекс трубопроводов;
- комплекс применения и фасовки удобрений.

Рассмотрим основное и вспомогательное оборудование установки [11].

*Комплекс подготовки сырья* включает:

- насосы с функцией дополнительного измельчения для загрузки сырья из приемника фермы;
- станция подготовки сырья для доведения субстрата до заданной влажности, подогрева, внесения закваски и микроэлементов;
- насосная станция – система перемешивания массы в станции подготовки и подачи подготовленного сырья в биореактор.

*Приемный бункер* – первый этап подготовки органических отходов к эффективному сбраживанию. Бункер имеет любую форму, выполнен из разных материалов, выполняет задачи предварительной сортировки, измельчения и смешивания сырья. Чем мельче фракция отходов, поступающих на сбраживание в биореактор, тем эффективнее процесс переработки и выделения биогаза. Микроорганизмы быстрее преобразуют мелкодисперсные частицы в метан и эффлюент.

*Станция подготовки сырья* – одна из важных единиц биогазового комплекса, в которой происходит подготовка органического сырья к сбраживанию. Представляет утепленную ёмкость вертикального или горизонтального типа. Суточная порция сырья прогревается до технологической температуры, активизируется аборигенная микрофлора, происходит удаление кислорода. При необходимости в станцию подготовки вносят закваски, пищевые добавки, энзимы, скоропортящиеся компоненты, которые нельзя добавлять в приемный бункер. Станция подготовки оснащена эффективной системой подогрева сырья за счет тепловой рубашки большой площади и системы перемешивания [12].

*Комплекс анаэробного сбраживания*

					ВКР.319695.180301.ПЗ	<i>Лист</i>
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

*Биореактор* (метантенк, ферментер) – основная единица биогазового комплекса, в которой происходит процесс ферментации органического сырья с биохимическим превращением подготовленной массы в биогаз и эффлюент. Биореактор представляет цилиндрическую герметичную ёмкость, горизонтального или вертикального типа, оборудованную системой перемешивания и системой подогрева. Имеет внешнюю теплоизоляционную оболочку. Контроль объема сырья, контроль температуры внутри реактора происходит по показаниям датчика уровня, датчикам температуры. Биореактор оборудован рН-метром для контроля уровня рН. Реактор работает непрерывно, заполняется объёмно-доливным способом, с одного торца происходит загрузка свежей порции смеси, а с другого торца производится выгрузка готового эффлюента. Загрузка и выгрузка осуществляются шнековыми насосами.

*Комплекс автоматизации*

Система автоматизированного управления операциями загрузки сырья, выгрузки готового эффлюента, запуска когенерационной установки и конденсационных котлов, отображения текущего процесса со всеми контролируемые параметрами. Сигнализация о неисправностях в оборудовании и аварийных ситуациях.

*Комплекс сбора и очистки биогаза* включает:

- фильтр очистки биогаза от сероводорода и воды;
- газгольдер для временного хранения биогаза и сглаживания суточного выхода биогаза;
- газодувка – вихревой компрессор.

*Система очистки биогаза* – устройство для подготовки биогаза к его дальнейшему хранению и использованию. Конструктивно система очистки биогаза состоит из колонны секции очистки от сероводорода, колонны секции осушения, кранов слива; рамы фильтра. Устанавливается на любом биогазовом комплексе для предотвращения коррозии оборудования. Биогаз всегда содержит в своем составе сероводород, который негативно влияет на работоспособность любого дальнейшего оборудования, датчиков и счётчиков [12]. Секция

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

осушки необходима для конденсации излишней влаги из биогаза для исключения намерзания паров воды в трубопроводах и газгольдерах.

*Газгольдер* – герметичный сосуд, выступает в роли временного накопителя биогаза. Выравнивает суточные «скачки» выработки биогаза биореактором. В России большее распространение приобрели отдельно установленные мягкие газгольдеры прямоугольного сечения. Выполнены газгольдеры из специального газонепроницаемого, влагустойчивого полимера. Полимерная ткань устойчива к включениям сероводорода и очень хорошо герметизируется при склеивании.

При необходимости создания высокого давления биогаза применяют толстостенные металлические газгольдеры. Объем газгольдера может быть небольшим, если газ расходуется непрерывно. Объем газгольдера может превышать суточный выход биогаза при его преобразования в электроэнергию или газомоторное топливо. Газгольдер может быть установлен в верхней части вертикального биореактора – конусная крыша, может быть отдельно стоящим шарообразным куполом.

*Вихревой компрессор* – применяется для создания давления, необходимого для работы газового котла или генератора. Внутри биореактора происходят одновременно несколько процессов: сбраживание, подогрев, перемешивание, загрузка, выгрузка. Для их оптимального прохождения давление регулируется и удерживается на уровне не более чем 0,05 атм. Для работы любого дальнейшего теплового или генерирующего оборудования необходимо создать давление, соответствующее его техническим характеристикам [12].

*Факельная установка* – вертикальное устройство, газовая горелка с пьезоподжигом, предназначенное для сжигания биогаза при технологических пусках и остановках оборудования, при залповых выбросах газа во время продувок и при аварийных выбросах. При недостаточном потреблении биогаза комплексом или когенерационным оборудованием может образоваться его переизбыток. Сброс его в атмосферу вредит экологии. Входящие в состав биогаза метан и диоксид углерода являются парниковыми газами. Сброс биогаза в атмосферу

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

может создать пожароопасную ситуацию, смесь метана и кислорода воздуха в определенной пропорции взрывоопасна. Самым безопасным способом сброса лишнего газа является сжигание его на факельной установке. В процессе сброса газ поступает на горелку и поджигается искровым разрядом от пьезоподжига.

#### *Когенерационная установка*

Когенерация – процесс, при котором тепло и электричество вырабатываются одновременно в особом устройстве, когенераторе. Типичным примером является газовая электростанция. Смысл когенерации в том, что при прямой выработке электрической энергии создается возможность утилизации попутного тепла. Когенератор включает в себя генератор, газовый двигатель, систему отбора тепла, систему управления. Когенерация – оптимальный способ применения биогаза для обеспечения объекта и теплом, и электрической энергией.

*Газопоршневая электростанция* – агрегат для производства электрической энергии из внутренней энергии топлива. Основной конструкции является двигатель внутреннего сгорания. Топливом служит биогаз, при сгорании которого выделившаяся энергия используется генератором электрического тока. Преимуществами газопоршневых электростанций являются простота в использовании и невысокая стоимость топлива. Двигатель приводит в действие электрогенератор, который производит электроэнергию. При работе двигателя (при его охлаждении и отборе тепла выхлопных газов с помощью теплообменника) разогревается вода, которая используется для отопления зданий и сооружений.

Одновременная выработка электроэнергии и тепла (когенерация) позволяет установке достигать значительной эффективности, которая в зависимости от технологии составляет от 85 % до 95 %. Комбинированные теплоэлектростанции на биогазе надежны и долговечны.

Когенераторы располагаются в непосредственной близости от конечных потребителей, исключая потери энергии при ее транспортировке. Это дополнительно повышает рентабельность использования биогаза в схеме производства и потребления энергии [12].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

*Дополнительное оборудование:* сети и устройства распределения тепловой и электрической энергии; газовый котел, сепаратор, резервуар переработанной массы, линия для сушки, розлива, фасовки удобрений.

### **1.5 Целевые продукты биогазовой установки**

На выходе из биореактора получается два целевых продукта – биогаз и эффлюент.

Биогаз – горючий газ, в составе содержит от 55 % до 80 % метана, двуокись углерода и в незначительном количестве другие примеси. Биогаз используют для получения тепловой и электрической энергии, после очистки до метана его можно использовать в качестве биотоплива.

#### *Варианты применения биогаза:*

а) энергоноситель:

- для получения водогрейного тепла сжиганием в газовом котле;
- для приготовления пищи сжиганием в газовой плите;
- для получения электрической энергии при сжигании в газовом электрогенераторе;
- для одновременного получения электрической энергии и тепла от охлаждения двигателя внутреннего сгорания при сжигании в когенерационной установке;

б) газомоторное топливо – после очистки и компримирования до 200 атм в баллонах высокого давления с целью заправки оборудованного автотранспорта. Поскольку биогаз содержит от 60 % до 80 % метана, то в качестве моторного топлива используют получаемый из него биометан путем удаления углекислого газа и других примесей, после чего газ имеет практически однородный состав, состоящий от 96 % до 98 % из метана [12].

Получаемый в результате переработки эффлюент (остаток ферментации) может быть использован в качестве удобрения, поскольку содержит в своем составе полный комплекс необходимых растениям элементов питания, биологически активных веществ, при практически полном отсутствии патогенных микроорганизмов, гельминтов, всхожих семян сорных растений.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Эффлюент можно непосредственно вносить на сельскохозяйственные поля, а можно подвергнуть сепарации, разделяя на твердую и жидкую фазы. Твердую часть гранулируют, добавляют в почвогрунт или используют в чистом виде как компост. Жидкая часть сохраняет все полезные свойства и после дополнительной фильтрации готова к запуску в систему капельного полива. Она не забивает форсунки поливальных систем, отверстия лейки. Эффлюент – основа для получения жидких и гранулированных органических биоудобрений, подстилки для животных и птиц, почвогрунтов.

Преимущества применения эффлюента:

– содержит все необходимые для растений компоненты: азот – 3,7 %, фосфор – 2,6 %, калий – 9,4 %, макроэлементы и микроэлементы: молибден, бор, медь, цинк, марганец, железо в легко доступном виде, консорциум ризосферных микроорганизмов, активные биологические стимуляторы роста растений класса ауксинов, повышающие выход урожая, гуминоподобные соединения для структурирования плодородного слоя почвы.;

– экономия на количестве лагун (специализированных площадок для хранения отходов) и минеральных удобрениях;

– сокращение срока выдержки (перепревание навоза – от 9 месяцев до 12 месяцев, эффлюент – от 15 дней до 20 дней);

– снижение класса опасности органических отходов.

В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов навоз классифицируется следующим образом: навоз КРС перепревший (хранение не менее шести месяцев) – V класс опасности; навоз КРС свежий – IV класс опасности; навоз от свиней свежий – III класс опасности; навоз от свиней перепревший (хранение не менее одного года) – IV класс опасности; птичий помет рассматривается как токсичные отходы производства III класса опасности [12].

### 1.6 Подготовка биогаза до товарного качества

Биогаз, полученный на биогазовой установке, содержит различные примеси, включая углекислый газ, сероводород, азот и водяной пар. Для обеспечения функциональной и эксплуатационной безопасности, а также безопасной

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



работы персонала биогаз должен предварительно очищен и подготовлен до товарного качества [13].

Процесс подготовки биогаза до товарного качества включает следующие этапы:

1. Очистка от примесей: для удаления углекислого газа и сероводорода используется процесс абсорбции. В этом процессе биогаз пропускается через абсорбент, который поглощает эти примеси.

2. Осушка: биогаз содержит водяной пар, который может вызвать коррозию и другие проблемы при использовании в двигателях или газовых турбинах. Для удаления водяного пара биогаз пропускается через осушитель.

3. Очистка от азота: азот в биогазе может вызвать проблемы при использовании в газовых турбинах. Для удаления азота используется процесс адсорбции.

4. Очистка от пыли: биогаз может содержать пыль и другие твердые частицы, которые могут вызвать проблемы при использовании в двигателях или газовых турбинах. Отделение взвешенных частиц необходимо во всех случаях с целью предотвращения засорения арматуры и газопроводов. Чаще всего достаточна грубая фильтрация в гравийном фильтре или центробежном сепараторе. Иногда применяют тонкие фильтры из стекловолокна, но это связано с повышением затрат.

5. Очистка от запаха: биогаз может иметь неприятный запах из-за присутствия сероводорода. Для удаления запаха используются такие методы как: адсорбция, абсорбция, мембранная очистка и окисление.

6. Сжатие или сжижение: после очистки биогаз сжимают до нужного давления для использования в двигателях или газовых турбинах.

После прохождения всех этапов биогаз становится готовым к использованию в качестве топлива или для продажи [14].

Степень очистки газа зависит от его назначения и может отличаться, что показано в таблице 4 [23].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица – 4 Требования по очистке биогаза

Способ использования биогаза	Необходимость очистки от			
	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Взвешенных частиц
Сжигание в бытовых газовых плитах	+	–	–	+
Сжигание в горелках инфракрасного излучения	+	–	–	+
Сжигание в отопительных котлах (подготовка горячей воды)	желательно	–	–	+
Использование в стационарных газовых двигателях	частично	–	–	+
Использование в качестве горючего для транспортных средств	+	+	+	+
Обработка до качества природного газа	+	+	+	+

### 1.7 Очистка биогаза от воды, сероводорода, углекислого газа

Биогаз, выходящий из ферментер, содержит водяной пар и сероводород, что приводит к коррозии трубопровода и другого оборудования. При активном перемешивании могут образовываться аэрозоли и мелкие капли жидкости, которые затем осаждаются и формируют отложения.

*Обезвоживать биогаз* необходимо по четырем основным критериям:

1. Снижение калорийности топлива: наличие водяных паров в топливе снижает теплоотдачу, ухудшая тем самым общую целесообразность синтеза газообразного биотоплива. Помимо прочего, сопутствующая вода – особенно нагретая до пара в результате сжигания метана – выступает в роли дополнительного коррозионного фактора;

2. Используемый в качестве топочного газа для обогрева помещений, биометан, не прошедший процедуру влагоудаления, может «намерзнуть» внутри газовых труб, сужая их просвет вплоть до полной остановки газопотока (особенно актуальна эта проблема в регионах с суровыми зимами);

3. При определенных термобарических условиях газы – в присутствии водяного пара – могут образовывать твердые кристаллические газовые гидраты

(клатраты), которые, скапливаясь в изгибах труб, могут мешать прохождению потока;

4. Если предприятие готово сбрасывать метан в газовую сеть общего пользования, оно обязано поставлять продукцию, соответствующую специальным нормам [15].

К методам осушения биогаза можно соотнести:

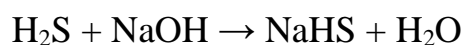
*1. Конденсация влаги в теплообменниках*

Принцип работы трубчатого рекуператора основывается на тепловом обмене через поверхность изолированных трубок, имеющих отличную от обрабатываемой среды температуру, в результате чего пары воды достигают точки росы и конденсируются в жидкость, которая механически сепарируется (отводится) от газопотока [30].

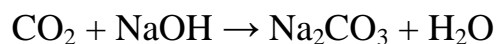
*2. Абсорбционная осушка / гликолевая (щелочная) промывка*

Данный подход часто используется для газосушки и заключается в барботаже газа-сырца через метастабильный высокотемпературный (200 °С) слой вспененного этиленгликоля. Гликоль хорошо сорбирует не только водяные пары, но и более тяжелые гомологи метана – пропан, бутан и другие. В подавляющем большинстве случаев мокрая абсорбция не подходит для осушения биогаза [15].

Реакция щелочной сорбции проходит по следующим реакциям:



Частичное взаимодействие с углекислым газом:



*3. Адсорбционное дегидрирование метановой смеси*

В качестве влагопоглощающих субстратов в адсорбционных модулях используется силикагель, активированный уголь, хлористый кальций и другие соединения, обладающие высокой гигроскопичностью. Одновременное адсорбционное обезвоживание и удаление сероводорода из биометана – технологически эффективный, но экономически неоправданный подход, подразумевающий частую регенерацию и замену адсорбента в силу его быстрого истощения.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Адсорбционная экстракция влаги целесообразна в тех случаях, когда речь идет о сверхтонкой – абсолютной очистке газов, которая, как правило, проводится в отношении биометана редко и только в условиях точного расчета экономической целесообразности таких процедур.

#### *4. Фильтрация водяных паров через эластомерные или стекловолоконные мембраны*

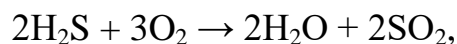
Мембранные фильтры широко используются в лабораториях разного профиля. Одно из широко востребованных изделий – фильтры из стекловолокна или полимеров. Они могут использоваться как самостоятельно, так и в качестве предфильтров для снижения нагрузки на основной фильтрующий элемент и для снижения и увеличения срока его эксплуатации.

Способы такого метода основаны на принципе разной скорости прохождения газов через мембраны. Мембраны состоят из пустотелых полимерных волокон, собранных в трубный пучок, благодаря чему обеспечивается максимальная площадь поверхности. Мембрана высокого качества должна иметь высокую проницаемость для молекул небольшого размера (например, CO<sub>2</sub>) и низкую – для крупных молекул (например, CH<sub>4</sub>).

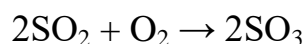
#### *Методы очистки биогаза от сероводорода (десульфуризация).*

Содержание сероводорода в биогазе может достигать 3 %, что в сочетании с водяными парами и углекислым газом усиливает коррозию металлических поверхностей оборудования [15].

При сжигании биогаза сероводород переходит в оксиды серы(IV):



при избытке воздуха:



Оксид серы(IV) и оксид серы(VI) – газы, взаимодействуя с водяным паром, образуют агрессивные сернистую и серную кислоты, которые являются коррозионными и активными. Кроме того, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub> – высокотоксичные газы. Очистка от сероводорода необходима для снижения токсичности и неприятного запаха биогаза, вредных выбросов с продуктами сгорания, коррозионной

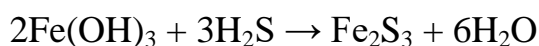
					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

опасности из-за наличия серосодержащих газов и кислот, некоррозионностойких материалов [15].

Очистка от сероводорода на действующих установках проводится различными методами:

*1. Физико-химический метод*

а) добавление в бродильный субстрат солей железа:



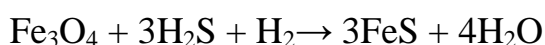
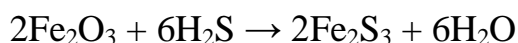
Регенерация:



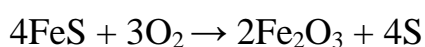
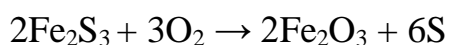
Этот метод преимущественен тем, что удаляет из биогаза не только  $\text{H}_2\text{S}$ , но и силоксаны, и галогенные соединения. Однако есть и недостаток: возникает проблема с утилизацией резервуаров, заполненных серой, поскольку их обслуживание обходится слишком дорого. Из-за высоких затрат данный метод сейчас практически не используется.

б) адсорбирование железосодержащими сорбентами в сухом фильтре

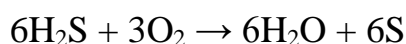
В данном способе в качестве сорбента может быть использован оксид железа(III). Процесс сорбции протекает следующим образом:



Регенерация сорбента проводится воздухом по реакциям:



Побочная реакция:



Данная реакция сопровождается тепловыделением, которое также частично осушает биогаз.

Ввиду небольшой скорости реакции контакт оксида железа (III) с биогазом должен быть до пяти минут, а скорость движения биогаза через очистную массу от 5 мм/с до 7 мм/с.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В зависимости от количества, подаваемого на регенерацию воздуха можно получать как элементарную серу, так и оксиды серы. Метод характеризуется дешевизной, возможностью регенерации хемосорбента, но существенным его недостатком является низкая степень очистки от сероводорода (до 10 мг/м<sup>3</sup>) и невозможность использования образующейся серы [18].

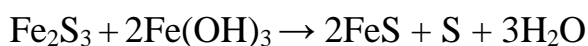
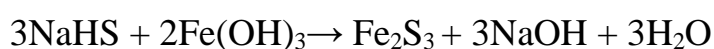
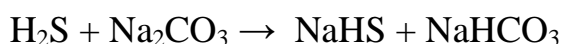
в) фильтр из активированного угля

Удаление сероводорода происходит в адсорбере с твердым слоем, через который проходит биогаз. Для адсорбции используется активированный уголь в виде мелких гранул [15].

г) в России разработан низкотемпературный хемосорбент ГИАП-10-2 на основе оксида цинка с активирующей добавкой оксида меди.

Близкий к этому методу – *железо-содовый метод*.

Основан на использовании в качестве поглотительного раствора взвеси гидроксида двух- и трехвалентного железа.



При этом около 70 % сероводорода переводится в элементарную серу, а 30 % – окисляется до тиосульфата натрия.

## 2. Биологический метод

Принцип действия заключается путем направленного нагнетания небольшого количества воздуха в газовую камеру ферментера. Метод получил широкое распространение. Благодаря деятельности серных бактерий при подаче воздуха сероводород превращается в элементарную серу, а также серную кислоту и воду. При этом сера выпадает в виде желтоватого осадка на поверхности субстрата и при внесении в грунт используется в качестве питательного вещества для растений.

Для получения хорошего результата необходимо выполнение следующих условий: бактерии должны содержаться в самом субстрате, а не внедряться в него извне; они нуждаются в воздухе для преобразования сероводорода в

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

элементарную серу, наличие влажной и теплой среды с поступлением питательных веществ. В качестве площади заселения выступают внешние стенки ферментатора и поверхность субстрата. Очистку биогаза от серы при помощи данного метода можно проводить и в биофилт্রে или газопромывателе [16].

### *3. Комбинированный метод*

Метод заключается в сочетании физико-химического и биологического методов очистки. Применяется там, где требуется газ высокой чистоты, с примесями не более 5 ppm. Например, в случае подачи в газоцентрали, при использовании биогаза в топливных элементах, в качестве моторного топлива. По причине высоких затрат и дорогостоящей технологии, метод не получил большого признания в производстве биогаза на сельскохозяйственных установках [17].

### *4. Мембранный метод*

Данный метод разделения основан на пропускании через мембрану сжатого компрессором биогаза: давление биогаза при помощи компрессора повышают до 10 атм и подают его в мембранный модуль. В итоге затраты на самообеспечение такой установки достигают до 30 % от выработанной энергии [18].

### *5. Адсорбционный метод*

Метод с помощью молекулярных сит позволяет производить из биогаза чистый метан, для этого из смеси фильтрами улавливаются углекислый газ, водяной пар и сероводород. Если молекулярные сита перегружены этими веществами, то их можно очистить при помощи продувания воздухом или регенерацией при нагревании. На практике такой способ редко применяется, но в будущем он может приобрести существенно большее значение, если возникнет потребность в производстве чистого метана для производства газомоторного топлива [18].

### *6. Абсорбционный метод*

Часто используются жидкие химические поглотители CO<sub>2</sub> – моно- и диэтанолламины. Они прочно связывают углекислый газ, не взаимодействуя с метаном, в результате получается фактически чистый метан. Для освобождения аминов от поглощенной углекислоты, жидкость нужно нагревать.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Энергетически такая технология начинает проигрывать. Способ моноэтаноламиновой очистки обеспечивает полное удаление из биогаза  $\text{CO}_2$  и снижение концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  до 0,001 % оборота [18].

### 1.8 Аккумуляция биогаза

Биогаз производится неравномерно и с недостаточным давлением, что приводит к проблемам при использовании газоиспользующего оборудования. Один из способов решения проблемы – сжигание излишков биогаза в факельной установке, но это приводит к потере энергии. Другой способ – использование газгольдеров разных типов. Газгольдеры бывают прямыми, где постоянно находится определенный объем газа, и непрямыми, где аккумулируется энергия промежуточного теплоносителя. Газгольдеры низкого давления используются чаще всего. Они предназначены для хранения газа при мало колеблющемся давлении и значительно изменяющемся объеме. Вместимость газгольдеров высокого давления может быть разной, от нескольких литров до десятков тысяч кубических метров. Преимущества газгольдеров высокого и среднего давления – небольшие габариты, отсутствие движущихся частей, но требуют дополнительного оборудования – компрессорной установки и регулятора давления [19].

Накопители биогаза под низким, средним и высоким давлением

Накопители под низким давлением получили наибольшее распространение. Варианты накопителей:

- газометр с погружными резервуарами;
- внешние пленочные накопители (пленочные мешки, пленочные трубы, пленочные подушки);
- внутренние пленочные накопители;
- биореакторы с свободнонесущими пленочными колпаками;
- биореакторы с двойной пленкой;
- биореакторы с пленочной крышей и центральной опорой.

Накопители среднего давления из металла (от 5 бар до 20 бар) используются при нехватке места. При уплотнении биогаза до 10 бар его объем сокращается в разы [20].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



## 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Сырьем для биогазовой установки могут служить различные органические отходы сельского хозяйства. Показания выхода биогаза и метана из различных видов сырья приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Выход биогаза и содержание в нем метана

Тип сырья	Выход газа (м <sup>3</sup> на килограмм сухого вещества)	Содержание метана (%)
<b>А. Навоз животных</b>		
Навоз крупного рогатого скота	0,250 – 0,340	65
Свиной навоз	0,340 – 0,580	65 – 70
Птичий помет	0,310 – 0,620	60
Конский навоз	0,200 – 0,300	56 – 60
Овечий навоз	0,300 – 0,620	70
<b>Б. Отходы хозяйства</b>		
Сточные воды, фекалии	0,310 – 0,740	70
Овощные отходы	0,330 – 0,500	50 – 70
Картофельная ботва	0,280 – 0,490	60 – 75
Свекольная ботва	0,400 – 0,500	85
<b>В. Растительные сухие отходы</b>		
Пшеничная солома	0,200 – 0,300	50 – 60
Солома ржи	0,200 – 0,300	59
Ячменная ржи	0,250 – 0,300	59
Овсяная солома	0,290 – 0,310	59
Кукурузная солома	0,290 – 0,460	59
Лен	0,360	59
Конопля	0,360	59
Свекольный жом	0,165	59
Листья подсолнечника	0,300	59
Клевер	0,430 – 0,490	59
<b>Г. Другое</b>		
Трава	0,280 – 0,630	70
Листья	0,210 – 0,290	58

					ВКР.319695.180301.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества			Лит	Лист	Листов
Разраб.	Есьман А.С.							У	33	69
Пров.	Лескова С.А.				АМГУ, ИКиИН, гр. 0107-об					
Н. Контр.	Родина Т.А.									
Утверд.	Гужель Ю.А.									

Объем выхода биогаза из различных видов сырья значительно варьирует в зависимости от типа сырья, который представлен в таблице 6 [21].

Таблица 6 – Выход биогаза из различного сырья

Органические отходы	Выход биогаза с 1 кг абсолютно сухого вещества, м <sup>3</sup> /кг	
	минимальный	максимальный
Навоз КРС	0,25	0,3
Свиной навоз	0,25	0,5
Птичий помет	0,4	0,6
Отходы бойни	0,4	0,6

#### *Характеристика продукции*

Основными компонентами биогаза являются: метан (от 55 % об. до 75 % об.), диоксид углерода (от 27 % об. до 44 % об.). В незначительных количествах содержится азот (N<sub>2</sub>), сероводород (H<sub>2</sub>S), водород (H<sub>2</sub>). В зависимости от содержания метана (от 55 % до 70 %) теплотворная способность биогаза составляет от 4700 ккал/м<sup>3</sup> до 6000 ккал/м<sup>3</sup> (от 20 МДж/м<sup>3</sup> до 25 МДж/м<sup>3</sup> или от 0,68 кг до 0,85 кг условного топлива), соответственно. По своим характеристикам он близок к природному газу, теплотворная способность которого составляет от 6000 ккал/м<sup>3</sup> до 9500 ккал/м<sup>3</sup>, при средней калорийности природного газа 7900 ккал/м<sup>3</sup> [22].

Технологический процесс биогазовой установки позволяет получить готовую продукцию, а именно: биогаз и биоудобрения. Биогаз определяется содержанием метана либо соотношением горючего метана (CH<sub>4</sub>) к «бесполезной» двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>). Двуокись углерода разбавляет биогаз и вызывает потери при его хранении. Поэтому важно стремиться к высокому содержанию метана и как можно низкому содержанию двуокиси углерода. Биогаз можно применять в качестве топлива для автомобильных двигателей, причем эффективность его в этом случае зависит от содержания метана и наличия примесей.

Области практического применения биогаза:

– для обеспечения собственных энергетических потребностей БГУ (в холодный период года практически весь потенциал биогаза используется для

энергоснабжения установки);

– как топливо для получения горячей воды или пара для покрытия технологических потребностей очистных сооружений или сельскохозяйственного производства;

– для сушки сброженного осадка;

– как топливо для получения тёплого воздуха или горячих газов для сушки сельскохозяйственной продукции или обогрева сельскохозяйственных построек;

– в теплицах для отопления и интенсификации процессов фотосинтеза зеленых растений углекислым газом;

– для замены мазута при термической обработке отходов (25 тонн мазута в сутки заменяется 45 000 м<sup>3</sup> биогаза);

– как горючее для двигателей транспортных средств;

– для выработки электроэнергии;

– для подпитки сетей природного газа.

Углекислый газ в составе биогаза является балластным веществом, однако при максимальном его извлечении из газовой смеси можно определить его потенциальное применение в следующих областях:

– увеличение урожайности: для эффективного роста растений необходимо увеличить концентрацию углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в тепличных условиях, что достигается путем искусственного повышения его содержания в воздухе;

– производство химических соединений: карбоната кальция, карбоната натрия и др.;

– преобразование углекислого газа в сухой лед: сухой лед получается из газообразного диоксида углерода при – 78,5 °С. От обычного льда он отличается тем, что не тает при нагревании, а испаряется без остатка. Сухой лед можно использовать в различных отраслях промышленности.

– защита растений от вредителей и болезней: углекислый газ используют для искусственного тумана, который помогает контролировать численность вредителей и болезни растений.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

– пищевая промышленность: пищевая добавка E290 (диоксид углерода) применяется в пищевой промышленности в роли консерванта, регулятора кислотности и антиоксиданта.

Биометан, как моторное топливо, имеет высокую теплоту сгорания от 50 МДж/кг до 55 МДж/кг и октановое число – 110, что превышает аналогичные характеристики бензина, которые, соответственно, равны 44 МДж/кг и октановое число от 72 до 85. По сравнению с нефтяными моторными топливами биометан имеет более высокую детонационную стойкость, что позволяет в двигателях внутреннего сгорания снижать концентрацию вредных веществ в отработанных газах и уменьшать количество отложений в двигателе.

Биометан, получаемый из биомассы, является возобновляемым источником энергии или топлива со свойствами, близкими к свойствам природного газа. Биометан содержит от 20 % до 50 % энергии природного газа и может применяться для приведения в действие устройств типа газовых турбин или использоваться для получения электричества и тепла. Он дешевле в производстве, поскольку стоимость установки для получения биометана ниже, чем для добычи природного газа.

Применение биометана в качестве топлива способствует снижению выбросов парниковых газов и ограничивает зависимость от нефтепродуктов, что влияет на позитивное воздействие на окружающую среду. Таким образом, биометан представляет собой важный элемент перехода к более экологически устойчивым источникам энергии и сыграет значимую роль в содействии передовым парадигмам устойчивого развития.

*Эффлюент* – жидкие и твердые продукты переработки биоотходов в био-реакторе. Эффлюент (биоудобрения) применяются в качестве улучшения плодородия почвы и повышения урожайности сельскохозяйственных культур; подкормки растений в садах и огородах, способствуя их здоровому росту и развитию; улучшения качества почвы и поддержки роста растений в ландшафтных проектах; добавления в компостные кучи для ускорения процесса разложения органических материалов и улучшения качества компоста [30].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2.2 Описание технологической схемы биогазовой установки

Технологическая схема биогазовой установки представлена на рисунке 1.

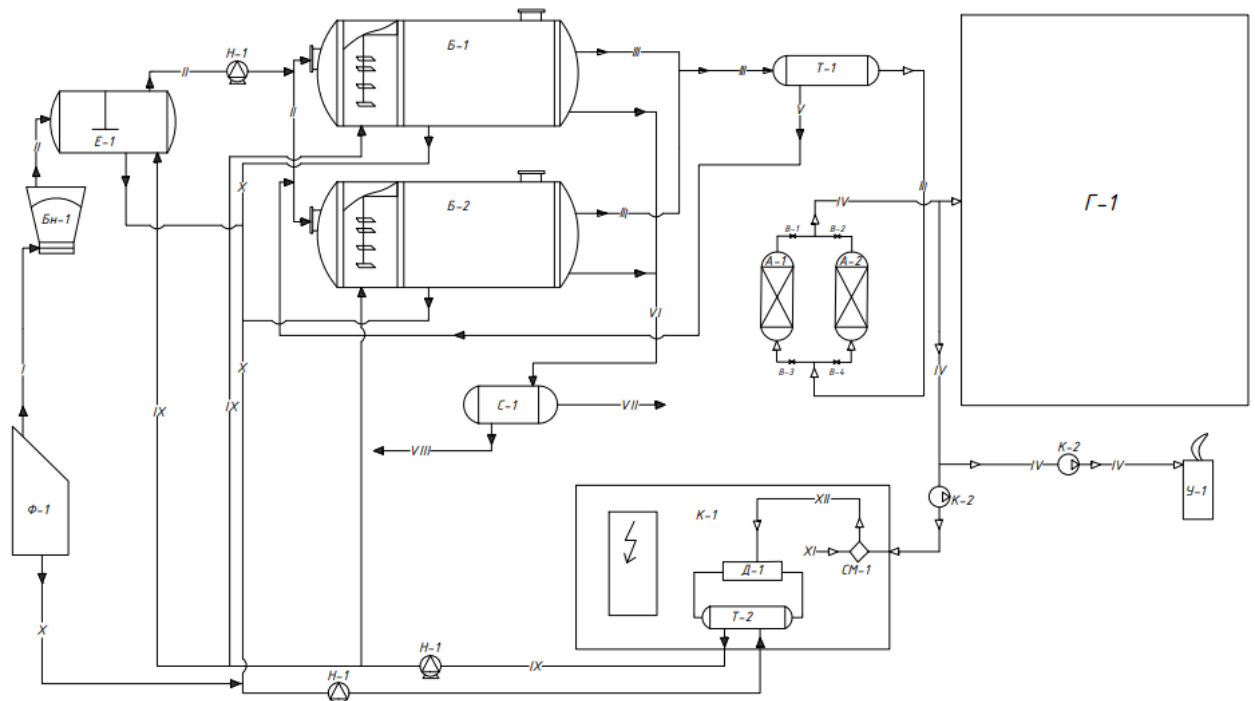


Рисунок 1 – Технологическая схема биогазовой установки:

- Ф-1 – ферма; Е-1 – емкость для сбора и гомогенизации сырья;  
 Б-1-2 – биореакторы; Бн-1 – бункер для хранения гомогенизированного сырья;  
 Г-1– газгольдер; Т-1 – теплообменник; Т-2 – водонагреватель;  
 А-1, А-2 – адсорбер; В-1-4 – вентиль; У-1 – факел;  
 К-1 – когенерационная установка; К-2 – компрессор; Н-1 – насос;  
 С-1– сепаратор; Д-1 – двигатель внутреннего сгорания; См-1 – смеситель;  
 I – сырье с фермы; II – гомогенизированное сырье; III – неочищенный биогаз;  
 IV – товарный биогаз; V – конденсат; VI – эфлюент;  
 VII – жидкое биоудобрение; VIII – твердые биоудобрения; IX – горячая вода;  
 X – холодная вода; XI – воздух; XII – газоздушная смесь

Сырье I предварительно проходит комплекс подготовки. Жидкие отходы с фермы перемешиваются насосом и подаются по трубопроводу в емкость Е-1. Рядом с емкостью Е-1 расположен приемный бункер Бн-1 для подачи твердых органических отходов (подстилочный навоз).

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Станция подготовки навоза предназначена для сбора, гомогенизации и подогрева сырья до требуемой температуры. Здесь суточная порции сырья прогревается до технологической температуры, активизируется микрофлора, происходит частичное удаление кислорода, мешающего метаногенным бактериям. В станцию подготовки при необходимости могут быть внесены закваски, пищевые добавки, специальные энзимы.

Далее подготовленная порция сырья с помощью насоса Н-1 поступает в комплекс анаэробного сбраживания, который включает два биореактора Б-1, Б-2 с мешалками. Внутри реактора поддерживается фиксированная температура. Режим ферментации – мезофильный (от 35 °С до 37 °С). Перемешивание биомассы внутри реактора производится каждые четыре часа с целью поддержания процесса брожения и равномерного распределения микроорганизмов, устранения образования корки и застойных зон. Перемешивание производится погружной мешалкой. В течение нескольких дней происходит ее превращение органики в биогаз и органическое удобрение – эффлюент.

Биогаз III на выходе из реактора имеет температуру от 30 °С до 35 °С, насыщен водяными парами, содержит примеси и требует предварительной подготовки. Он направляется в систему очистки – устройство для подготовки биогаза к дальнейшему хранению и использованию. Она необходима для конденсации излишней влаги и удаления сероводорода из биогаза для исключения намерзания паров воды в трубопроводах и газгольдерах, а также для предотвращения коррозии газопотребляющего оборудования.

В теплообменнике Т-1 биогаз охлаждается, водяные пары конденсируются V и отводятся обратно в биореактор. В адсорберах А-1 и А-2 осушенный биогаз очищается от сероводорода. Процесс основан на физическом поглощении  $H_2S$  в порах твердого поглотителя – активированного угля. Температура реакции – 40 °С. Для регенерации угля применяется продувка потоком горячего (300 °С) регенерированного газа.

После адсорберов осушенный и очищенный биогаз IV с помощью компрессора К-2 направляется на когенерационную установку для обеспечения

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

биогазовой установки электроэнергией и теплом. Часть тепла используется для обогрева станции подготовки сырья, для поддержания температуры брожения, другая часть тепла направляется на нужды фермы.

Избыток биогаза собирается в накопителе – газгольдере Г-1 из мягкого полимерного материала. При избыточном накоплении газ может быть направлен на сжигание в факельную установку У-1.

Температурный режим биореакторов обеспечивается путем подачи горячей воды по трубопроводам от когенерационной установки. Температура воды после когенерационной установки равна 90 °С. Горячая вода с температурой 90 °С смешивается с водой 40 °С и поступает в реактор с температурой 60 °С. Вода специально подготовленная и рециркуляционная.

После переработки отходов в биореакторе образуется остаточная жидкость – эффлюент VI. Это органическое удобрение, которое можно непосредственно вносить на поля. Можно разделить на твердую и жидкую части в сепараторе С-1. Твердую часть гранулируют, добавляют в торфогрунт или используют в виде компоста. Жидкая часть после сепарации сохраняет все полезные свойства, ее удобно использовать. Она не забивает форсунки поливальных систем, отверстия лейки, после дополнительной фильтрации ее можно запускать в систему капельного полива.

Управление процессом полностью автоматизировано. Контролируются все этапы и параметры получения биогаза, работа насосных станций, мешалок, системы подогрева, когенерационной установки. Реализован дистанционный контроль с компьютера и смартфона [19].

## **2.3 Расчет биогазовой установки**

### **2.3.1 Расчет количества субстрата и выхода биогаза**

Исходным сырьем биогазовой установки служат органические отходы, поступающие с КФХ ИП Бибииков А.Д., расположенной в селе Дмитриевка Амурской области. Численность КРС и нормы выхода отходов приведены в таблице 7 [29].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 7 – Численность на ферме и нормы выхода отходов КРС

Группа животных	Количество голов	Выход отходов, кг/сут		Влажность отходов, %	
		Твердые	Жидкие	Твердые	Жидкие
Быки	200	30	10	85	94
Коровы	102	35	20	85	94
Нетели	13	20	7	85	94
Телята до 1 года	43	5	2,5	85	94
Итого	358	90	29,5	–	–

Для расчета биогаза используем методику [23].

Суточный выход биогаза  $V_{\text{биог}}$ , м<sup>3</sup>/сут, определяется по формуле:

$$V_{\text{биог}} = G_{\text{н}} \cdot g, \quad (1)$$

где  $g = 25$  – удельный выход биогаза, м<sup>3</sup> на 1 т перерабатываемого субстрата или сухого вещества;

$G_{\text{н}}$  – суточное количество перерабатываемого субстрата (или сухого вещества), т/сут.

По технологическим нормам определяется количество субстрата (таблица б). Количество подстилки для крупного скота принимается равным 3 кг/сут, для телят – 2 кг/сут, для нетель – 2 кг/сут [23].

Рассчитаем общую массу отходов и соломы на одну голову животного:

$$m_{\text{общ}} = m_{\text{тв.отх.}} + m_{\text{жид.отх.}} + m_{\text{подст.}}$$

$$m_{\text{общ (бык)}} = 30 + 3 + 10 = 43 \text{ кг};$$

$$m_{\text{общ (корова)}} = 35 + 3 + 20 = 58 \text{ кг};$$

$$m_{\text{общ (нетель)}} = 20 + 7 + 3 = 30 \text{ кг};$$

$$m_{\text{общ (теленки)}} = 5 + 2,5 + 2 = 9,5 \text{ кг}.$$

Количество сухого вещества, кг, рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{сух.отх.}} = m_{\text{норм.тв.}} \cdot \frac{(100 - x_c)}{100}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{норм.тв.}}$  – норма выхода твердого субстрата, кг/сут;

$x_c$  – влажность субстрата, %.

Рассчитаем количество сухого вещества в твердых отходах:

$$m_{\text{сух.отх. (быки)}} = \frac{30 \cdot (100 - 85)}{100} = 4,5 \text{ кг};$$

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40



$$m_{\text{сух.отх. (коровы)}} = \frac{35 \cdot (100 - 85)}{100} = 5,25 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.отх. (нетели)}} = \frac{20 \cdot (100 - 85)}{100} = 3 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.отх. (телята)}} = \frac{5 \cdot (100 - 85)}{100} = 0,75 \text{ кг}.$$

Рассчитаем количество сухого вещества в жидких отходах:

$$m_{\text{жид.отх.}} = m_{\text{норм.жид.}} \cdot \frac{(100 - x_c)}{100}, \quad (3)$$

Где  $m_{\text{норм.тв.}}$  – норма выхода жидкого субстрата, кг/сут;

$x_c$  – влажность субстрата, %.

$$m_{\text{жид.отх. (быки)}} = \frac{10 \cdot (100 - 94)}{100} = 0,6 \text{ кг};$$

$$m_{\text{жид.отх. (коровы)}} = \frac{20 \cdot (100 - 94)}{100} = 1,2 \text{ кг}$$

$$m_{\text{жид.отх. (нетели)}} = \frac{7 \cdot (100 - 94)}{100} = 0,42 \text{ кг};$$

$$m_{\text{жид.отх. (телята)}} = \frac{2,5 \cdot (100 - 94)}{100} = 0,15 \text{ кг}.$$

Рассчитаем количество сухого вещества в подстилке:

$$m_{\text{сух.подст.}} = \frac{m_{\text{п}} \cdot (100 - x_{\text{п}})}{100}, \quad (4)$$

Где  $m_{\text{п}}$  – количество подстилки для животных, кг/сут;

$x_{\text{п}} = 14 \%$  – влажность соломы.

$$m_{\text{сух.подст. (быки)}} = \frac{3 \cdot (100 - 14)}{100} = 2,58 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.подст. (коровы)}} = \frac{3 \cdot (100 - 14)}{100} = 2,58 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.подст. (нетели)}} = \frac{2 \cdot (100 - 14)}{100} = 1,72 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.подст. (телята)}} = \frac{2 \cdot (100 - 14)}{100} = 1,72 \text{ кг}.$$

Рассчитаем общее количество сухого вещества в смеси субстрата и подстилки:

$$m_{\text{сух.общ}} = m_{\text{сух.отх.}} + m_{\text{жид.отх.}} + m_{\text{сух.подст.}}, \quad (5)$$

$$m_{\text{сух.общ (быки)}} = 4,5 + 0,6 + 2,58 = 7,68 \text{ кг};$$

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

$$m_{\text{сух.общ}} (\text{коровы}) = 4,5 + 1,2 + 2,58 = 8,28 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.общ}} (\text{нетели}) = 3 + 0,42 + 1,72 = 5,14 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сух.общ}} (\text{телята}) = 0,75 + 0,15 + 1,72 = 2,62 \text{ кг}.$$

Рассчитаем усредненный процент сухого вещества в массе рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{уср}} = \frac{m_{\text{сух.общ}} \cdot 100}{m_{\text{общ}}}, \quad (6)$$

Где  $m_{\text{сух.общ}}$  – общее количество сухого вещества в смеси отходов и подстилки, кг;

$m_{\text{общ}}$  – общая масса отходов и соломы, кг.

$$m_{\text{уср}} (\text{быки}) = \frac{7,68 \cdot 100}{43} = 17,9 \%;$$

$$m_{\text{уср}} (\text{коровы}) = \frac{8,28 \cdot 100}{58} = 14,3 \%;$$

$$m_{\text{уср}} (\text{нетели}) = \frac{5,14 \cdot 100}{30} = 17,1 \%;$$

$$m_{\text{уср}} (\text{телята}) = \frac{2,62 \cdot 100}{9,5} = 27,6 \%;$$

Влажность всей массы:

$$\omega = 100 - m_{\text{уср}}, \quad (7)$$

$$\omega_{(\text{быки})} = 100 - 17,9 = 82,1 \%;$$

$$\omega_{(\text{коровы})} = 100 - 14,3 = 85,7 \%;$$

$$\omega_{(\text{нетели})} = 100 - 17,1 = 82,9 \%;$$

$$\omega_{(\text{телята})} = 100 - 27,6 = 72,4 \%;$$

Рассчитаем количество отходной смеси на одну голову животного при влажности 85 %:

$$m_{\text{кол-во смеси}} = \frac{m_{\text{общ}} \cdot (100 - \omega)}{100 - 85}, \quad (8)$$

$$m_{\text{кол-во смеси}} (\text{быки}) = \frac{43 \cdot (100 - 82,1)}{100 - 85} = 51,3 \text{ кг};$$

$$m_{\text{кол-во смеси}} (\text{коровы}) = \frac{58 \cdot (100 - 85,7)}{100 - 85} = 55,3 \text{ кг};$$

$$m_{\text{кол-во смеси}} (\text{нетель}) = \frac{30 \cdot (100 - 82,9)}{100 - 85} = 34,2 \text{ кг}.$$

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

$$m_{\text{кол-во смеси (телята)}} = \frac{9,5 \cdot (100 - 72,4)}{100 - 85} = 17,5 \text{ кг};$$

Рассчитаем суммарное количество субстрата влажностью 85 %:

$$G_{\text{н}} = m_{\text{кол-во смеси}} \cdot N_{\text{кол-во голов}}, \quad (9)$$

$$G_{\text{н}} = 51,3 \cdot 200 + 55,3 \cdot 102 + 34,2 \cdot 13 + 17,5 \cdot 43 = 17098 \text{ кг}$$

Рассчитаем суммарный объем субстрата:

$$V = \frac{G_{\text{н}}}{\rho} \cdot 1000,$$

$\rho = 900 \text{ кг/м}^3$  – плотность субстрата.

$$V = \frac{17098}{900} \cdot 1000 = 18998 \text{ л} = 19 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Тогда объем биогаза из данного количества субстрата составит:

$$V_{\text{биогаз}} = G_{\text{н}} \cdot g, \quad (10)$$

$$V_{\text{биогаз}} = 19 \cdot 25 = 475 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Сведем полученные результаты в таблицу 8.

Таблица 8 – Выход отходов на одну голову каждой группы животных

Характеристика	Группа животных			
	быки	коровы	нетели	телята
Общая масса отходов и соломы, кг	43	58	30	9,5
Количество сухого вещества, кг	4,5	5,25	3	0,75
Количество сухого вещества в жидких отходах, кг	0,6	1,2	0,42	0,15
Количество сухого вещества в подстилке, кг	2,58	2,58	1,72	1,72
Общее количество сухого вещества в смеси субстрата и подстилки, кг	7,68	8,28	5,14	2,62
Усредненный процент сухого вещества в массе, %	17,9	14,3	17,1	27,6
Влажность всей массы, %	82,1	85,7	82,9	72,4
Отходная смесь при влажности 85 %, кг	51,3	55,3	34,2	17,5

### 2.3.2 Расчет размеров биореактора

Для определения объема биореактора используем исходные данные: суточная загрузка субстрата, длительность сбраживания, периодичность загрузки и выгрузки субстрата из биореактора [23].

С точки зрения надежности эксплуатации рекомендуется установка не менее двух биореакторов. В случае остановки одного реактора работает другой. Каждый из них рассчитывается на сбраживание половины общего суточного

количества субстрата. Требуемая вместимость, м<sup>3</sup>, каждого реактора рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{н}} \cdot \tau}{n}, \quad (11)$$

где  $G_{\text{н}}$  – суточная загрузка субстрата м<sup>3</sup>/сут;

$\tau$  – длительность сбраживания, сут;

$n$  – количество биореакторов.

Для снижения потерь тепла через стенки биореактора его форму нужно выбрать так, чтобы поверхность теплообмена была минимальной. Цилиндрическая емкость имеет наименьшую поверхность при соотношении высоты (длины)  $h$  и радиуса  $R$  реактора, равном:

$$h = 4 \cdot D = 8 \cdot R \quad (12)$$

Исходя из условия (12), требуемые размеры биореактора:

– объем  $V$ , м<sup>3</sup>:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h \quad (13)$$

– площадь поверхности  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + \pi \cdot R \cdot h \quad (14)$$

Подставив (12) в (13), получим формулу для расчета радиуса биореактора  $R$ , м:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h = \pi \cdot R^2 \cdot 8 \cdot R = 8 \cdot \pi \cdot R^3$$

$$R = 0,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{\text{тр}}}{\pi}} \quad (15)$$

Определим размеры биореакторов в сельскохозяйственной биогазовой установке с суммарным суточным выходом субстрата 19 м<sup>3</sup>/сут. Длительность сбраживания субстрата 11 суток.

Примем к установке два метантенка, вместимость каждого из которых составит:

$$V_{\text{тр}} = \frac{19 \cdot 11}{2} = 104,5 \text{ м}^3.$$

Оптимальный радиус биореактора:

$$R = 0,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{104,5}{3,14}} = 1,6 \text{ м}.$$

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Примем к установке биореактора радиусом  $R = 1,6$  м или диаметром  $D = 3,2$  м и высотой  $h = 12,8$  м  $\approx 13$  м.

Объем каждого биореактора по формулы (13):

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h = 3,14 \cdot 1,6^2 \cdot 13 = 105 \text{ м}^3.$$

Площадь поверхности каждого реактора по формуле (14):

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,6^2 + 3,14 \cdot 1,6 \cdot 13 = 81,4 \text{ м}^2.$$

Несколько большие размеры реактора по сравнению с требуемыми для размещения субстрата обеспечивают свободное пространство над поверхностью сбраживаемой массы для накопления биогаза [23].

### 2.3.3 Материальный баланс биогазовой установки

В среднем при анаэробном сбраживании около 65 % биомассы превратится в биогаз, а оставшиеся 35 % биомассы станут остаточным материалом, который может быть использован в качестве биоудобрения [24].

Количество разложившейся биомассы, кг, рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{разл}} = \frac{G_{\text{н}} \cdot x}{100}, \quad (16)$$

где  $G_{\text{н}}$  – суммарное количество субстрата, кг;

$x$  – количество разложившихся отходов.

Тогда,

$$m_{\text{разл}} = \frac{17098 \cdot 65}{100} = 11114 \text{ кг.}$$

Количество отходов в остатке (биоудобрений), кг, рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{ост}} = G_{\text{н}} - m_{\text{разл}}. \quad (17)$$

Тогда,

$$m_{\text{ост}} = 17098 - 11114 = 5984 \text{ кг.}$$

Рассчитаем объемное содержание  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , %, в составе биогаза по формуле:

$$V_i = \frac{V_{\text{биогаз}} \cdot x_i}{100}, \quad (18)$$

где  $x_i$  – содержание каждого компонента в биогазе, %.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда,

$$V_{CH_4} = \frac{475 \cdot 65}{100} = 308,8 \text{ м}^3;$$

$$V_{CO_2} = \frac{475 \cdot 32}{100} = 152,0 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = \frac{475 \cdot 1}{100} = 4,8 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2S} = \frac{475 \cdot 2}{100} = 9,5 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем массовое содержание  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ , кг, в составе биогаза по формуле:

$$m = \frac{m_{\text{разл}} \cdot V_i}{V_{\text{биогаз}}}. \quad (19)$$

Тогда,

$$m_{CH_4} = \frac{11114 \cdot 308,8}{475} = 7225,27 \approx 7225 \text{ кг};$$

$$m_{CO_2} = \frac{11114 \cdot 152,0}{475} = 3556,48 \approx 3556 \text{ кг};$$

$$m_{N_2} = \frac{11114 \cdot 4,8}{475} = 112,31 \approx 112 \text{ кг};$$

$$m_{H_2S} = \frac{11114 \cdot 9,5}{475} = 222,28 \approx 222 \text{ кг}.$$

Масса субстрата, поступающего на переработку, равна массе получаемых компонентов – биогаза и биоудобрения.

Составим материальный баланс БГУ в таблице 9.

Таблица 9 – Материальный баланс биогазовой установки

Компоненты	Приход, кг	Компоненты	Расход, кг
Субстрат	17098	Метан ( $CH_4$ )	7225
		Углекислый газ ( $CO_2$ )	3556
		Азот ( $N_2$ )	112
		Сероводород ( $H_2S$ )	222
		Остаток (биоудобрения)	5983
Итого	17098	Итого	17098

### 2.3.4 Тепловой баланс биогазовой установки

Статьи расхода теплоты на нужды биогазовой установки:

- на подогрев свежего субстрата до температуры брожения;
- на компенсацию теплопотерь биореактора через ограждающие конструкции;
- на компенсацию теплопотерь биореактора с биогазом и с водяными парами.

Определим тепловую потребность сельскохозяйственной биогазовой установки, расположенной в районе с температурой наружного воздуха в холодный период года  $t_n = \text{минус } 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Установка оборудована двумя биореакторами радиусом 1,6 м и длиной 13 м. Общее количество жидкого субстрата 23,77 м<sup>3</sup>, влажность субстрата 85 %. Длительность сбраживания 11 суток. Режим сбраживания – мезофильный ( $t_p = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Выход биогаза составляет 475 м<sup>3</sup>/сут.

Потенциальный тепловой поток от сжигания выделившегося биогаза рассчитывается по формуле:

$$Q_{\Gamma}^* = \frac{Q_n \cdot V_{\text{биогаз}}}{24 \cdot 3600}, \quad (20)$$

где  $Q_n = 25000 \text{ кВт/м}^3$  – низшая теплота сгорания биогаза;

$V_{\text{биогаз}}$  – выход биогаза, м<sup>3</sup>/сут.

Тогда,

$$Q_{\Gamma}^* = \frac{25000 \cdot 475}{24 \cdot 3600} = 13,7 \text{ кВт.}$$

Суточная загрузка субстрата рассчитывается по формуле [22]:

$$m_c = \rho \cdot G_n, \quad (21)$$

$$m_c = 900 \cdot 19 = 17098 \text{ кг.}$$

где  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$  – плотность субстрата;

$G_n$  – суточная загрузка субстрата м<sup>3</sup>/сут;

Тепловой поток, необходимый для подогрева свежего субстрата при продолжительности нагрева  $\Delta t = 24$  часа рассчитывается по формуле:

$$Q_c = \frac{m_c \cdot c_p \cdot (t_{бр} - t_c)}{3600 \cdot \Delta t}, \quad (22)$$

$c_p = 4,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$  – теплоемкость субстрата;

$t_{бр}$  – температура брожения,  $^\circ\text{C}$ ;

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$t_c$  – минимальная температура свежего субстрата, °С;

$\Delta\tau$  – время нагрева, ч.

Минимальная температура свежего субстрата принимается равной 5 °С в холодный период года и 15 °С в теплый.

Тогда:

$$Q_{c(\text{холодный период года})} = \frac{17098 \cdot 4,2 \cdot (35 - 5)}{3600 \cdot 24} = 24,93 \text{ кВт};$$

$$Q_{c(\text{теплый период года})} = \frac{17098 \cdot 4,2 \cdot (35 - 15)}{3600 \cdot 24} = 16,62 \text{ кВт}.$$

Тепловой поток через ограждающие конструкции для каждого биореактора определяется по формуле:

$$Q_{k(\text{теплый период года})} = S \cdot k \cdot (t_{бр} - t_n), \quad (23)$$

где  $S$  – поверхность теплообмена реактора, м<sup>2</sup>;

$k = 0,2$  – коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_n$  – расчетная температура наружного воздуха для холодного периода года.

Тогда,

$$Q_k = 81,4 \cdot 0,2 \cdot (35 - (-30)) = 1058,2 \text{ Вт} = 1,058 \text{ кВт}.$$

Для определения теплотерь с биогазом вычислим его плотность. Состав биогаза в % по объему: CH<sub>4</sub> – 65 %, CO<sub>2</sub> – 32 %, N<sub>2</sub> – 1 %, H<sub>2</sub>S – 2 %. Молекулярные массы компонентов:  $\mu(\text{CH}_4) = 16$  г/моль,  $\mu(\text{CO}_2) = 44$  г/моль,  $\mu(\text{N}_2) = 28$  г/моль,  $\mu(\text{H}_2\text{S}) = 34$  г/моль [23].

Считая, что биогаз подобен смеси идеальных газов, плотность каждого компонента биогаза определяется по формуле:

$$\rho_i = \frac{P + \mu_i \cdot k_i}{RT}, \quad (24)$$

где  $P$  – абсолютное давление биогаза (избыточное давление газа в биореакторе принимается равным от 2 кПа до 3 кПа);

$\mu_i$  – молекулярная масса  $i$ -го компонента;

$k_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента;

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$R = 8,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная;

$T = 308 \text{ К}$  – абсолютная температура газа, равная температуре режима сбраживания.

Рассчитаем плотность компонентов биогаза при избыточном давлении в биореакторе 2 кПа:

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{0,65 \cdot (101,325 + 2) \cdot 16}{8,31 \cdot 308} = 0,420 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{0,32 \cdot (101,325 + 2) \cdot 44}{8,31 \cdot 308} = 0,568 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{N}_2} = \frac{0,1 \cdot (101,325 + 2) \cdot 28}{8,31 \cdot 308} = 0,113 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{0,2 \cdot (101,325 + 2) \cdot 34}{8,31 \cdot 308} = 0,275 \text{ кг/м}^3.$$

Суммарная плотность биогаза составит:

$$\rho = 0,420 + 0,568 + 0,113 + 0,275 = 1,376 \text{ кг/м}^3.$$

Теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$c_{\text{биогаз}} = \sum_{i=1}^n v_i \cdot c_i, \quad (25)$$

где  $v_i$  – объемная доля  $i$ -го компонента в газе;

$c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -го компонента при постоянном давлении (таблица 10).

Таблица 10 – Удельная теплоемкость газов

Газы	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{S}$
Теплоемкость $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	2,483	0,837	1,051	1,026

Изобарная теплоемкость биогаза  $c_{\text{биогаз}}$  составит:

$$c_{\text{биогаз}} = 0,65 \cdot c_{\text{CH}_4} + 0,32 \cdot c_{\text{CO}_2} + 0,1 \cdot c_{\text{N}_2} + 0,2 \cdot c_{\text{H}_2\text{S}}$$

$$c_{\text{биогаз}} = 0,65 \cdot 2,483 + 0,32 \cdot 0,837 + 0,1 \cdot 1,051 + 0,2 \cdot 1,026 = 2,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Рассчитаем объемное теплосодержание биогаза  $Q_{\text{г}}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$  рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{г}} = \rho \cdot c_{\text{биогаз}} \cdot t_{\text{р}}, \quad (26)$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c_{\text{биогаз}}$  – удельная теплоемкость биогаза,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$t_p$  – температура газа, °С.

Тогда,

$$Q_{\Gamma} = 1,376 \cdot 2,19 \cdot 35 = 105,47 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплопотери  $Q_{\text{биог}}$ , кВт, связанные с выходом биогаза из реактора, определяются по формуле:

$$Q_{\text{биог}} = \frac{Q_{\Gamma} \cdot V_{\text{биог}}}{24 \cdot 3600} \quad (27)$$

где  $Q_{\Gamma}$  – объемное теплосодержание биогаза, кДж/м<sup>3</sup>.

Тогда,

$$Q_{\text{биог.}} = \frac{105,47 \cdot 475}{24 \cdot 3600} = 0,580 \text{ кВт.}$$

Биогаз насыщен водяными парами, поэтому необходимо учесть и тепловую энергию, уносимую с ними. Теплопотери  $Q_{\text{в.п.}}$ , связанные с уносом водяного пара, определяются так же, как и для теплового потока, уносимого биогазом [23].

Давление насыщенных водяных паров при температуре 35 °С составляет 4,754 кПа, теплоемкость  $c = 4,174 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}$  [22]. Плотность водяного пара  $\rho_{\text{в.п.}}$  составит:

$$\rho_{\text{в.п.}} = \frac{18 \cdot (101,3 + 4,754)}{8,31 \cdot 308} = 0,746 \text{ кг/м}^3.$$

Рассчитаем объемное теплосодержание водяного пара:

$$Q_{\text{п}} = \rho_{\text{в.п.}} \cdot c \cdot 35 \text{ °С} \quad (28)$$

$$Q_{\text{п}} = 0,746 \cdot 4,174 \cdot 35 = 108,98 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитаем теплопотери с водяными парами:

$$Q_{\text{в.п.}} = \frac{V_{\text{биог}} \cdot Q_{\text{п}}}{24 \cdot 3600} \quad (29)$$

$$Q_{\text{в.п.}} = \frac{475 \cdot 108,98}{24 \cdot 3600} = 0,599 \text{ кВт.}$$

Рассчитаем суммарные теплопотери двух биореакторов:

$$Q = Q_{\text{к}} \cdot 2 + Q_{\text{биог.}} + Q_{\text{в.п.}} \quad (30)$$

$$Q = 1,058 \cdot 2 + 0,580 + 0,599 = 3,295 \text{ кВт.}$$

Рассчитаем суммарный тепловой поток на нужды биогазовой установки:

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_T = Q + Q_{c(\text{холодный период года})} \quad (31)$$

$$Q_T = 3,295 + 24,93 = 28,23 \text{ кВт.}$$

Определим тепловой поток, необходимый для каждого биореактора:

$$Q_T^1 = \frac{28,23}{2} = 14,12 \text{ кВт.}$$

Обогрев биореактора выполняется путем размещения по периметру его стенок теплообменников в виде спирали из труб. Теплоноситель – горячая вода. Температура воды на входе в спиральный теплообменник равна 60 °С, скорость ее движения  $v = 1,2$  м/с.

Расчет поверхностей нагрева проводится для одного биореактора. Тепловой поток  $Q_T$ , который необходимо возместить нагревательными приборами, составляет 14,12 кВт. Предварительные расчеты показывают, что целесообразно выбрать трубы диаметром 50 мм с толщиной стенки 3 мм.

Площадь живого сечения трубы  $f$ ,  $\text{м}^2$ , по которой циркулирует теплоноситель:

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (32)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м.

Площадь живого сечения трубы диаметром 8 м:

$$f = \frac{3,14 \cdot (0,05 - 2 \cdot 0,003)^2}{4} = 0,0015 \text{ м}^2.$$

Объемный расход теплоносителя,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяется как:

$$V = f \cdot v, \quad (33)$$

где  $v =$  от 1,0 м/с до 1,2 м/с – скорость движения теплоносителя.

Тогда секундный объемный расход теплоносителя:

$$V = 0,0015 \cdot 1,2 = 0,0018 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Массовый расход теплоносителя,  $\text{кг}/\text{с}$  [23]:

$$G = V \cdot \rho, \quad (34)$$

где  $\rho = 983,2 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность теплоносителя при 60 °С [22].

$$G = 0,0018 \cdot 983,2 = 1,77 \text{ кг}/\text{с}.$$

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Перепад температур на входе и выходе нагревательных приборов  $\Delta t$ , °С

$$\Delta t = \frac{Q_T^1}{G \cdot c}, \quad (35)$$

где  $c = 4,18$  кДж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды при начальной температуре теплоносителя  $t_{в.н.} = 60$  °С [22].

Тогда средний температурный напор составит [22] :

$$\Delta t = \frac{14,12}{1,77 \cdot 4,18} = 1,9 \text{ °С.}$$

Конечная температура воды  $t_{в.к.}$ , °С, на выходе из приборов определяется по формуле:

$$t_{в.к.} = t_{в.н.} - \Delta t. \quad (36)$$

Тогда,

$$t_{в.к.} = 60 - 1,9 = 58,1 \text{ °С.}$$

Средняя температура теплоносителя, °С, определяется по формуле:

$$t_{ср} = \frac{t_{в.н.} + t_{в.к.}}{2}. \quad (37)$$

Тогда,

$$t_{ср} = \frac{60 + 58,1}{2} = 59,05 \text{ °С}$$

Расчет коэффициентов теплоотдачи выполняется с использованием критериев подобия. Режим течения теплоносителя определяется по величине числа Рейнольдса ( $Re$ ):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (38)$$

где  $\nu = 0,485 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость жидкости (воды) [22];

$d$  – характерный размер (диаметр трубы), м;

$v = 1,2$  м/с – скорость движения теплоносителя.

Число  $Re$  будет равно:

$$Re = \frac{1,2 \cdot 0,05}{0,485 \cdot 10^{-6}} = 123711.$$

$123711 > 10000$ , следовательно, режим течения теплоносителя турбулентный.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), вычисляется как

$$\alpha = \frac{l \cdot Nu}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (39)$$

где  $l = 7,7$  м – характерный линейный размер системы;

$\lambda_{\text{ж}} = 0,659$  Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности;

$Nu$  – число Нуссельта:

$$Nu = \frac{0,021 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,68}}{Pr_{\text{с}}^{0,25}}, \quad (40)$$

где  $Pr_{\text{ж}}$  и  $Pr_{\text{с}}$  – значения критерия Прандтля, относящиеся к средней температуре жидкости и стенки, соответственно [22].

Значения критерия Прандтля, относящиеся к температуре:

жидкости:  $Pr_{\text{ж}} = 2,59$ ;

стенки:  $Pr_{\text{с}} = 2,98$ .

Подставив значения в формулы (35) и (36), получим:

$$Nu = \frac{0,021 \cdot 123711^{0,8} \cdot 2,59^{0,68}}{2,98^{0,25}} = \frac{0,021 \cdot 11855,69 \cdot 1,91}{1,31} = 363;$$

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{7,7 \cdot 363}{0,659} = 4241 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), находится по формуле для цилиндрической стенки:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha \cdot d_{\text{в}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}}\right)} + \frac{1}{\lambda \cdot d_{\text{н}}} + R_{\text{н}} + R_{\text{в}}, \quad (41)$$

где  $d_{\text{в}}$  и  $d_{\text{н}}$  – соответственно внутренний и наружный диаметр трубы, м;

$d_{\text{в}} = 0,044$  м,  $d_{\text{н}} = 0,050$  м.

$\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, из которого сделана стенка, для стали  $\lambda = 60$  Вт/(м·°С);

$R_{\text{н}}$  и  $R_{\text{в}}$  – соответственно факторы загрязнения со стороны субстрата и со стороны теплоносителя, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

Значения факторов загрязнения по справочным данным:

$R_{\text{н}} = 0,002$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $R_{\text{в}} = 0,02$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Коэффициент теплопередачи составит:

$$k = \frac{1}{4241 \cdot 0,044} + \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot \ln\left(\frac{0,050}{0,044}\right)} + \frac{1}{60 \cdot 0,050} + 0,002 + 0,02 = 30,05 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Средний температурный напор, °C:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{M}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{M}}}\right)}, \quad (42)$$

$$\text{где } \Delta t_{\delta} = \Delta t_{\text{в.н.}} - t_{\text{бр}}, \text{ °C}; \quad (43)$$

$$\Delta t_{\text{M}} = \Delta t_{\text{в.к.}} - t_{\text{бр}}, \text{ °C}; \quad (44)$$

$t_{\text{бр}}$  – температура в бродильной камере, °C.

Тогда,

$$\Delta t_{\delta} = 60 - 35 = 25 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{M}} = 58,1 - 35 = 23,1 \text{ °C};$$

$$\Delta t = \frac{25 - 23,1}{\ln\left(\frac{25}{23,1}\right)} = 24,0 \text{ °C}. \quad (45)$$

Поверхность теплообмена  $F$ ,  $\text{м}^2$ , определяется как

$$F = \frac{Q_{\text{T}}^1}{k \cdot \Delta t'} \quad (46)$$

где  $Q_{\text{T}}^1$  – тепловой поток, который необходимо возместить нагревательными приборами, Вт;

$k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;

$\Delta t$  – средний перепад температур, °C.

$\Delta t$  – средний перепад температур, °C.

Тогда,

$$F = \frac{14120}{30,05 \cdot 24,0} = 19,58 \text{ м}^2.$$

Общая требуемая длина труб для обогрева, м:

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{H}}}; \quad (47)$$

$$l = \frac{19,58}{3,14 \cdot 0,05} = 124,7 \text{ м}.$$

Расчет выполнен для горизонтальных труб. Внутренний периметр  $\Pi$  м, биореактора:

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Pi = \pi \cdot D_{\text{в}}, \quad (48)$$

где  $D_{\text{в}} = 8$  – диаметр реактора, м.

$$\Pi = 3,14 \cdot 3,2 = 10,05 \text{ м.}$$

Количество витков обогревательных труб:

$$n = \frac{1}{\Pi}; \quad (49)$$

$$n = \frac{124,7}{10,05} = 12,41 \approx 12.$$

Принимаем теплообменник с 12 витками.

Затраты теплоты на собственные нужды процесса:

$$Q_{\text{с.н.}}^{\text{период года}} = \frac{G_{\text{н}} \cdot c \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{с}})}{0,7} \quad (50)$$

$$Q_{\text{с.н.}}^{\text{зим}} = \frac{19 \cdot 4,2 \cdot (35 - 5)}{0,7} = 3420 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{с.н.}}^{\text{лет}} = \frac{19 \cdot 4,2 \cdot (35 - 15)}{0,7} = 2280 \text{ кДж.}$$

Общее количество биогаза, на собственные нужды:

$$V_{\text{биог.н}}^{\text{зим}} = \frac{3420}{25} = 136,8 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$V_{\text{биог.н}}^{\text{лет}} = \frac{2280}{25} = 91,2 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Выход товарного биогаза:

$$V_{\text{биог.т}}^{\text{период года}} = V_{\text{биог}} - V_{\text{биог.н}}^{\text{период года}} \quad (51)$$

$$V_{\text{биог.т}}^{\text{зим}} = 475 - 136,8 = 338,2 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{биог.т}}^{\text{лет}} = 475 - 91,2 = 383,8 \text{ м}^3.$$

Коэффициент расхода биогаза на собственные нужды:

$$\eta_{\text{биог}}^{\text{зим}} = \frac{V_{\text{биог.н}}^{\text{период года}}}{V_{\text{биог}}} \quad (52)$$

$$\eta_{\text{биог}}^{\text{зим}} = \frac{136,8}{475} = 0,29 = 29 \%;$$

$$\eta_{\text{биог}}^{\text{лет}} = \frac{91,2}{475} = 0,19 = 19 \%.$$

На основании расчета для мезофильного режима расход биогаза на соб-

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

ственные нужды в зимний период составляет 29 %, а в летний период 19 %. Таким образом, выход товарного биогаза в зимний период составляет 71 %, а в летний период 81 % [23].

### 2.3.5 Расчет биогазового когенератора

Утилизация биогаза с получением тепла предусматривает использование теплогенераторов, а электроэнергии – электрогенераторов. Для совместного получения тепла и электроэнергии можно использовать когенераторы. Расход биогаза для получения тепла, электроэнергии  $q_{\text{биог}}$ , м<sup>3</sup>/ч, определяется как:

$$q_{\text{биог}} = \frac{3600 \cdot P}{\eta \cdot Q_{\text{н}}}, \quad (53)$$

где  $P$  – паспортная мощность генератора (тепловая, электрическая), кВт;

$\eta$  – КПД генератора (тепловой, электрический);

$Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания биогаза, кДж/м<sup>3</sup>.

Требуется определить расход очищенного биогаза с низшей теплотой сгорания 25000 кДж/м<sup>3</sup> для получения электрической и тепловой энергии когенератором АГП-60 (ЭГП-60) когенерационная установка, имеющем следующие характеристики: расход газа при номинальной мощности (0,3 м<sup>3</sup>/ч · 1кВт) – 18 м<sup>3</sup>/ч, электрическую мощность – 60 кВт, электрический КПД – 44 %, тепловую мощность – 80 кВт, тепловой КПД – 45 %, КПД общий – 89 % [25].

Расход биогаза для получения электроэнергии  $q_{\text{биог.эл}}$ :

$$q_{\text{биог.эл}} = \frac{3600 \cdot 60}{0,44 \cdot 25000} = 19,6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход биогаза для получения тепловой энергии  $q_{\text{биог.теп}}$ :

$$q_{\text{биог.теп}} = \frac{3600 \cdot 80}{0,45 \cdot 25000} = 26,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Подведем итог расчетов технологической части:

1. Определено суммарное количество субстрата, поступающего на переработку – 17098 кг/сут (17,1 т/сут).
2. Определен выход биогаза – 475 м<sup>3</sup>/сут.
3. Рассчитаны основные размеры биореакторов: диаметр – 3,2 м; длина – 13 м; объем – 105 м<sup>3</sup>; площадь поверхности – 81,4 м<sup>2</sup>.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56



4. Составлен материальный баланс биогазовой установки, согласно которому выход биоудобрений – 5983 кг/сут (6 т/сут).

5. Составлен тепловой баланс биогазовой установки, согласно которому расход биогаза на собственные нужды в зимний период составляет 29 %, а в летний период 19 %; выход товарного биогаза в зимний период составляет 71 %, а в летний период 81 %.

6. Подобран биогазовый когенератор АГП-60 (ЭГП-60). Расход биогаза для получения электроэнергии составляет 19,6 м<sup>3</sup>/ч, для получения тепловой энергии – 26,2 м<sup>3</sup>/ч.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Безопасность жизнедеятельности является важной составляющей при работе с биогазовыми установками. Биогазовые установки используются для переработки органических отходов в биогаз, который затем может использоваться в качестве источника энергии. Однако, работа с такими установками требует соблюдения определенных мер безопасности, чтобы предотвратить возможные аварии и обеспечить безопасность работников и окружающей среды.

С помощью рассмотрения научно-исследовательских работ можно выявить определенные угрозы для установки, которые могут возникнуть во время эксплуатации ферментатора в результате нарушения технологического процесса или механического повреждения:

– разгерметизация мембраны газгольдера и образования в его объеме газозооной смеси, которая при наличии источника зажигания (короткое замыкание в смесителе осадка) вызывает взрыв;

– механическое повреждение верхней защитной оболочки ферментатора и мембраны, вследствие чего происходит утечка газа из резервуара, который при наличии источника зажигания может воспламениться и поддерживать горение.

Учитывая, что территория парка газгольдеров защищена молниезащитой, сценарий попадания молнии в газгольдер не рассматривается. Дополнительные средства противопожарной защиты газгольдера отсутствуют.

Во время взрыва в одном из ферментаторов возникает возможность повреждения его конструкций и их разброса в пространстве, что может привести к повреждению верхней защитной оболочки соседнего ферментатора с последующим развитием аварии [23].

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	58	69
Н. Контр.	Родина Т.А.				АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об			
Утверд.	Гужель Ю.А.							

Поэтому условием безопасного расстояния между ферментатором по сценарию взрыва избрано максимально возможное расстояние разлета обломков ферментатора.

При разрушении верхней защитной оболочки соседнего биореактора может произойти выброс биогаза из этого биореактора, что дополнительно усугубит ситуацию и увеличит риск для окружающей среды и персонала, а именно может привести к еще большему пожару.

Пожар на производстве может представлять серьезную угрозу для жизни и здоровья персонала из-за следующих причин:

1. Огненное распространение: пожар может быстро распространиться по зданию или производственной площадке, создавая опасность для людей, которые могут оказаться в зоне возгорания.

2. Дым и токсичные вещества: при пожаре выделяются дым и токсичные газы, которые могут быть вдыхаемыми персоналом. Это может привести к отравлению, ожогам дыхательных путей и другим серьезным последствиям для здоровья.

3. Обвалы и разрушения: пожар может вызвать обвалы конструкций, падение оборудования или разрушение зданий, что также может привести к гибели персонала.

4. Затрудненный доступ и эвакуация: пламя и дым могут затруднить доступ к выходам из здания или производственной площадки, что делает эвакуацию персонала сложной и опасной.

5. Паника и недостаток информации: в условиях пожара персонал может впасть в панику, что усложняет эвакуацию и принятие правильных решений. Недостаток информации о ситуации также может увеличить риск для персонала.

Для минимизации рисков гибели персонала из-за пожара необходимо соблюдать все меры пожарной безопасности, проводить регулярные тренировки по эвакуации и действиям в случае пожара, а также иметь соответствующее оборудование для тушения пожаров и предотвращения их возникновения [25].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так же есть риск по утечке газа, при котором если вдохнуть биогаз достаточной концентрации и продержат его определенное время, то он может вызвать смерть вследствие отравления либо удушья. Если биогаз не очищен, то сероводород оказывает сильное токсическое воздействие. Особенно опасность возникает, когда человек привыкает к высокой концентрации гнилостного запаха сероводорода и перестает обращать внимание на возможные опасные последствия.

Биогаз, очищенный от серы, может привести к смерти из-за недостатка кислорода, так как биогаз легче чем воздух (плотность = 1,2 кг/Нм<sup>3</sup>), то он склонен к расслоению. При этом тяжелый углекислый газ собирается (плотность = 1,85 кг/Нм<sup>3</sup>) внизу, в то время как более легкий метан (плотность = 0,72 кг/Нм<sup>3</sup>) поднимается кверху [23].

### **3.1 Требования безопасности при эксплуатации биогазовой установки**

Биогазовая установка должна соответствовать требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0 и настоящего стандарта ГОСТ Р 53790–2010 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам» [26].

Основные требования безопасности включает в себя:

1. Биогазовая установка должна отвечать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004.
2. Электротехническое оборудование и обслуживающее помещение метантенков должны быть оборудованы резервным электропитанием, чтобы обеспечить постоянную работу вентиляторов с необходимой кратностью воздухообмена.
3. Не допускается нахождение работников и проведение любых работ в помещениях биореакторов при неработающей вентиляции.
4. В соответствии с ГОСТ 30852.9 в обслуживающих помещениях биореакторов необходимо использовать электрическое освещение, электродвигатели, пусковые и токопитающие устройства, аппаратуру в исполнении,

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

обеспечивающем защиту от взрывоопасных ситуаций согласно указанному классу взрывоопасной зоны.

В помещениях биореакторов должны находиться:

- комплект противопожарного инвентаря;
- диэлектрические перчатки и ковры у щитов управления электроагрегатами;
- газоанализаторы или газосигнализаторы;
- средства индивидуальной защиты;
- взрывобезопасные аккумуляторные фонари;
- аптечка первой доврачебной помощи.

Газовые сети каждого метантенка должны быть оборудованы устройством для отключения от магистрального трубопровода. Трубопроводы коммуникаций биореакторов необходимо окрашивать в желтый цвет.

Ежедневно должен проводиться осмотр газовой сети и газовых устройств, оборудования и приборов биогазовой установки. Необходимо вести наблюдения за состоянием противопожарного инвентаря (при эксплуатации биогазовой установки для этих целей должна выделяться бригада не менее чем из двух работников).

Работники, обслуживающие биореакторы и связанное с ними газовое хозяйство, обязаны проходить обучение и проверку знаний, а также инструктаж и проверку по охране труда; контролировать концентрацию газов в воздухе помещений биореакторов с помощью газоанализаторов; не допускать утечки газов.

В газовых системах биореакторов давление газа должно постоянно контролироваться с помощью проверенных средств измерений давления. При давлении в газовых системах выше нормального и авариях на напорном газопроводе газ следует сжигать на свече.

Нарушение герметичности сварных швов, муфтовых и других соединений трубопроводов газовых систем определяется с помощью мыльного раствора, который в местах утечки образует пузырьки.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В помещениях, где обнаружена утечка газа, должны быть приняты срочные меры по устранению загазованности. Устранение утечки осуществляется в соответствии с планом мероприятий организации [27].

При проведении ремонтных работ в загазованной среде помещений применяют слесарные инструменты, изготовленные из цветного металла, исключая возможность искрообразования.

Рабочая часть инструментов из черного металла должна обильно смазываться солидолом или другой смазкой. Применение в загазованной среде электрических инструментов, дающих искрение, запрещается. Полы в зоне работ выстилают резиновыми коврами.

Сварочные или другие работы, связанные с применением открытого огня, проводятся на биореакторах и обслуживающих их помещениях с соблюдением особых мер предосторожности, с учетом требований правил безопасности в газовом хозяйстве. На проведение указанных работ выдают наряд-допуск. Выполнять работы допускается при действующей вентиляции и постоянном контроле состава воздушной среды в помещениях.

Биореакторы, хранилища биоудобрений и другие сооружения биогазовых установок должны быть построены так, чтобы избежать соприкосновения обслуживающего персонала с перерабатываемым сырьем.

Требования охраны окружающей среды и здоровья персонала включает в себя:

1. Работа биогазовых установок должна быть организована так, чтобы сырье для них – отходы животноводства и растениеводства, осадки и промышленных вод – не загрязняли водные ресурсы.

2. При организации работы биогазовых установок следует исключить хранение отходов под открытым небом, уменьшая тем самым выбросы в атмосферу метана (парниковый газ) и загрязнение воздуха азотистыми соединениями, имеющими неприятных запах.

3. Необходимо соблюдать предохранительные меры для предотвращения заражения обслуживающего персонала биогазовой установки патогенной

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

микрофлорой, содержащейся в осадках сточных вод и отходах сельскохозяйственного производства. Не рекомендуется принимать пищу рядом с биогазовыми установками [28].

Требования по электромагнитной совместимости электрооборудования, входящего в состав биогазовой установки, должны быть установлены в стандартах на биогазовые установки конкретных видов и соответствовать требованиям ГОСТ 30804.6.1 и ГОСТ 30804.6.3.

### **3.2 Средства индивидуальной защиты обслуживающего персонала**

В биогазовых установках персонал может подвергаться воздействию различных вредных факторов, таких как шум, вибрация, высокие температуры, агрессивные газы и жидкости, микроорганизмы и другие. Поэтому для защиты персонала используются различные средства индивидуальной защиты (СИЗ). По типовым нормам предусмотрено бесплатная выдача специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам сквозных профессий и должностей всех видов экономической деятельности, занятым на работах с вредными и опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением:

1) выдача одного костюма, могут выдаваться два костюма одновременно с увеличением срока носки в два раза.

2) на наружных работах зимой могут выдаваться куртка на утепляющей прокладке или костюм на утепляющей прокладке со сроком носки "по поясам".

3) наружные работы зимой или работы в неотапливаемых помещениях, могут выдаваться подшлемники под каску с однослойным или трехслойным утеплителем.

4) при наружных работах зимой в III, IV и особом климатических поясах может выдаваться маска для защиты лица от пониженных температур со сроком носки "до износа".

5) при газоопасных работах (I, II группы) выдается специальная одежда из тканей, имеющих в своем составе антистатическую нить.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вместо перчаток с полимерным покрытием могут выдаваться перчатки антистатические.

6) когда требуется эффективная защита в условиях, где необходимы повышенная видимость и узнаваемость, вместо специальной одежды, предусмотренной настоящими Нормами, следует выдавать специальную сигнальную одежду повышенной видимости [28].

7) в районах, где в весенне-летний период наблюдается массовый лет кровососущих насекомых или где имеется опасность заражения клещевым энцефалитом, дополнительно к специальной одежде, специальной обуви, предусмотренным настоящими Нормами, выдаются: костюм против энцефалитный со сроком носки 3 года.

8) работникам, которым по условиям труда не требуется защита пальцев ног, вместо ботинок кожаных с защитным подноском, сапог кожаных с защитным подноском, сапог резиновых с защитным подноском, могут выдаваться ботинки кожаные, сапоги кожаные, сапоги резиновые.

9) В том случае, если такие средства индивидуальной защиты, как страховочная привязь, удерживающая привязь (пояс предохранительный), диэлектрические галоши и перчатки, диэлектрический резиновый коврик, защитные очки (в том числе корректирующие), средство индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) против аэрозольное, маска или полумаска со сменными фильтрами, жилет сигнальный 2 класса защиты, защитный шлем, каска защитная, щиток лицевой для защиты от воздействия электрической дуги и тому подобное, могут быть выданы работодателем работникам на основании проведения специальной оценки условий труда в зависимости от характера выполняемых работ со сроком носки "до износа" или как "дежурные" [28].

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель выпускной квалификационной работы заключалась в расчете установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества.

В ходе исследования был проведен анализ научной и научно-технической литературы по теме исследования. Рассмотрено применение биогаза в различных аспектах жизни, классификация, состав и свойства биогаза. Изучена технология получения биогаза: сырье, химизм и параметры ведения процесса. Изучены требования к составу биогаза и способы очистки от нежелательных компонентов: влаги, сероводорода и диоксида углерода.

В ходе выполнения работы разработана и описана технологическая схема биогазовой установки. Рассчитаны количество субстрата и выход биогаза, размеры метантенков и биогазовый когенератор, составлены материальный и тепловой балансы на основе данных о численности КРС КФХ ИП Бибииков А.Д., расположенной в селе Дмитриевка Амурской области. Выход биогаза по расчетам составил 475 м<sup>3</sup> в сутки.

В заключительной части изучены требования безопасности охраны окружающей среды биогазовой установки. Поставленные задачи выполнены.

					ВКР.319695.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Есьман А.С.				Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.	Лескова С.А.					У	65	69
Н. Контр.	Родина Т.А.				АмГУ, ИКиИН, гр. 0107-об			
Утверд.	Гужель Ю.А.							

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Белозёров, Н. С. Производство биогаза – перспективный путь развития топливной энергетики / Белозёров Н. С, Трубаев П. А. // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. науч. тр. / Белгород. гос. технол. ун-т. им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2021. – С. 3953–3956.

2 Турсунбаева, Г. У. Производства биогаза из биомассы животноводства / Г. У. Турсунбаева, Б. Т. Бахтияр, Г. Э. Байжан, А. К. Мергалимова // Вестник казахской Академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2022. – № 3. – С. 171–181.

3 Пахалов, А. М. Методические аспекты оценки инвестиционной привлекательности регионов / А. М. Пахалов // Глобальные рынки и финансовый инжиниринг. – 2014. – № 1. – С. 53–62.

4 Кривкова, М. Д. Инновации в топливной энергетике / М. Д. Кривкова, Н. Н. Каргаполова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – № 1. – С. 173–178.

5 Зеленин, А. Г. Использование биогаза в энергетике / А. Г. Зеленин, Е. А. Козлов, И. Б. Шешеня, Ю. В. Васильченко // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. науч. тр. – Старый Оскол, 2016. – С. 102–103.

6 Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – 7-е изд. стереот. – М. : Московский энергетический институт, 2001. – 472 с.

7 Сидоренко, О. Д. Биоконверсия вторичных продуктов агропромышленного комплекса : моногр. О. Д Сидоренко. – Москва : Изд-во ИНФРА-М, 2023. – 296 с.

					<b>ВКР.319695.180301.ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Есьман А.С.			Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лит	Лист	Листов
Пров.		Лескова С.А.				У	66	69
Н. Контр.		Родина Т.А.			АМГУ, ИКиИН, гр. 0107-об			
Утверд.		Гужель Ю.А.						

8 Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига : Зинатне, 1988. – 203 с.

9 Микробиологическая анаэробная конверсия биомассы / под ред. В. Некрасов. – М. : Академическое издательство Лэпа Ламберта, 2014. – 688 с.

10 Шеина, О. А. Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии / О. А. Шеина, В. А. Сысоев // Вестник ТГУ. – 2009. – № 1. – С. 73–76.

11 ООО "СельхозБиоГаз" : Промышленные биогазовые установки [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://shbiogaz.ru/>. – 14.04.2024.

12 Рециклинг отходов АПК : справочник. / И. Г. Голубев [и др.]. – М. : ФГБНУ Р 45 «Росинформагротех», 2011. – 296 с.

13 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Теплогенерирующие и котельные установки и парогенераторы / сост. Г. М. Климов. – Н. : ННГАСУ, 2012. – № 1. – С. 1–33.

14 Braun, R. Biogas - Methangärung Organischer Abfallstoffe / R. Braun. – Verlag, Wien, New York: Springer, 1982. – 224 p.

15 Кочегурова, М. Е. Технологические аспекты производства биогаза / Кочегурова М. Е., Лескова С. А. // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – № 7. – С. 86–93.

16 Руководство по биогазу. От получения до использования [Электронный ресурс]. : Режим доступа : [http://esco.co.ua/journal/2012\\_9/art272.pdf/](http://esco.co.ua/journal/2012_9/art272.pdf/). – 12.04.2024.

17 Друзьянова, В. П. Технология очистки биогаза до качества моторного топлива / В. П. Друзьянова // Северо-Восточный федеральный университет : учеб. пособие / В. П. Друзьянова, О. П. Семенова. – Чебоксары, 2018. – Гл. 3. – С. 1–104.

18 Мариненко, Е. Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве: учебное пособие. – Волгоград : ВолгГАСА, 2003. – 100 с.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

19 Веденев, А. Г. Строительство биогазовых установок : краткое руководство / А. Г. Веденев, А. Н. Маслов. – Бишкек : «Евро», 2006. – 28 с.

20 Эдер Б. Биогазовые установки : практическое пособие / Эдер Барбара, Хайнц Шульц ; пер. с нем. 1996. – 27 с.

21 ООО «ПЗГО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://gas-cleaning.ru/>. – 14.03.2024.

22 Миронов, С. Ю. Технологические направления по переработке органических отходов / С. Ю. Миронов // Биологические науки : сб. науч. тр. / Курский гос. ун-т. Фак. экология и природопользование. – Курск, 2017. – С. 1–13.

23 Комина, Г. П. Получение и использование биогаза в решении задач энергосбережения и экологической безопасности : моногр. / Г. П. Комина, А. В. Сауц. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строительный ун.-т., ЭБС АСВ, 2017. – 96 с.

24 Кущев, Л. А. Технологии получения биогаза при анаэробной ферментации органических веществ / Л. А. Кущев, Д. Ю. Суслов, Д. О. Темников // ScienceTime. – 2015. – № 10. – С. 204–210.

25 D-system.ru : Компания «Дизель-Систем» [Электронный ресурс]. – Ярославль. – Режим доступа : <https://www.d-system.ru>. – 30.04.2024.

26 ГОСТ Р 53790-2010. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам ; введ. – 2001-01-01. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» ; М. : Московский печатник, 2011. – 15 с.

27 Приказ Минздравсоцразвития России от 11.08.2011 N 906н (ред. от 20.02.2014) «Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам химических производств» (Зарегистрировано в Минюсте России 05.09.2011 N 21737).

28 Система охраны труда : Типовые нормы СИЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://siz.trudohrana.ru/print/?jobId=14442>. – 11.04.2024.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

29 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета : РД-АПК 1.10.15.02-08 от 01.10.2008. // Министерство сельского хозяйства РФ – 2008. – 97 с.

30 ГОСТ Р 52808–2007. Издания. Нетрадиционные технологии; введ. 2009–01–01. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» ; М. : Московский печатник, 2009. – 9 с.

					ВКР.319695.180301.ПЗ	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

