

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

Факультет инженерно-физический
Кафедра химии и химической технологии
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая
технология природных энергоносителей и углеродных материалов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
_____ Ю.А. Гужель
« _____ » _____ 20__ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

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

Исполнитель студент группы 818-об	_____	Г.А. Решетов
	(подпись, дата)	
Руководитель доцент, канд. хим. наук	_____	С.А. Лескова
	(подпись, дата)	
Консультант по безопасности жизнедеятельности доцент, канд. техн. наук	_____	А.В. Козырь
	(подпись, дата)	
Нормоконтроль доцент, док. хим. наук	_____	Т.А. Родина
	(подпись, дата)	

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

Факультет Инженерно-физический
Кафедра Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 Ю.А. Гужель
«25» 05 2022 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Решетова Григория Алексеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества» утверждена Приказом от 04.04.2022 г №115-ОД
 2. Срок сдачи студентом законченной работы 23.06.2022 г.
 3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: поголовье КРС фермы АО Луч, с. Ивановка, Амурской области, влажность субстрата – 90 %, длительность сбраживания – 10 суток, режим брожения – мезофильный, температура воздуха в холодный период года – -25°C , состав биогаза: CH_4 – 65 %, CO_2 – 34 %, H_2S – 1 %. Технологическая документация, нормативная документация, литературные данные.
 4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по процессу получения биогаза из органических отходов. Характеристика сырья и готовой продукции биогазовой установки. Описание технологической схемы установки получения биогаза. Материальный и тепловой балансы биогазовой установки. Технологический расчет биореактора, когенератора.
 5. Перечень материалов приложения: 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 25.05.2022 г
- Руководитель выпускной квалификационной работы: Лескова Светлана Анатольевна, доцент, канд. хим. наук
- Задание принял к исполнению 25.05.2022 г.



РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 63 с., 7 рисунков, 8 таблиц, 25 источников.

БИОГАЗ, НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ОРГАНИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ, МЕТАНОГЕНЕЗ, МЕТАНТЕНК, МИКРООРГАНИЗМЫ

В работе представлен подбор и анализ литературы для рассмотрения способов переработки биомассы и основных методов очистки биогаза от нежелательных компонентов.

Цель работы – расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества.

В ходе работы изучены требования, предъявляемые к биогазу и сырью. Составлен тепловой и материальный балансы реактора, выполнен расчет метантенка и вспомогательного оборудования.

Разработана технологическая схема получения и очистки биогаза. Для выполнения чертежей было использовано программное обеспечение КОМПАС – 3Dv19.

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	3	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Литературный обзор	7
1.1 Свойства биогаза	7
1.2 Классификация биогазов	7
1.3 Получение биогаза	8
1.3.1 Исходное сырье	8
1.3.2 Химизм процесса образования биогаза	9
1.3.3 Классификация биогазовых установок	11
1.3.4 Факторы, влияющие на процесс	12
1.3.5 Классификация реакторов	13
1.3.6 Основное оборудование биогазовой установки	15
1.4 Доведение биогаза до товарного качества	17
1.4.1 Осушка биогаза	19
1.4.2 Обессеривание и очистка от галогенсодержащих компонентов	19
1.4.3 Удаление углекислого газа	25
1.4.4 Сжатие биогаза	27
1.5 Области применения биогаза	27
2 Технологическая часть	29
2.1 Характеристика сырья	29
2.2 Характеристика готовой продукции	30
2.3 Описание технологической схемы биогазовой установки	31
2.4 Расчет биогазовой установки	33
2.4.1 Определение количества субстрата и выхода биогаза	33
2.4.2 Определение размеров биореакторов	40

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	4	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

2.4.3	Тепловой баланс биогазовой установки	41
2.4.4	Материальный баланс биогазовой установки	51
2.4.5	Расчет биогазового когенератора	53
3	Безопасность и экологичность производства	55
3.1	Требования, предъявляемые к биогазовым установкам	55
3.1.1	Основные требования безопасности при эксплуатации установки	55
3.1.2	Требования охраны окружающей среды и здоровья персонала	57
3.2	Должностные инструкции оператора установки	57
	Заключение	59
	Библиографический список	60

ВВЕДЕНИЕ

В условиях сокращения мировых запасов природного газа и нефти, увеличения рыночных цен на них альтернативным видам топлива уделяется большое внимание. Поэтому поиск дополнительных источников, дающих возможность экономить традиционные виды топлива, является необходимым и вполне своевременным.

Наиболее перспективным газообразным топливом, получаемым путем анаэробной ферментации органической биомассы, является биогаз, интерес к применению которого в последние годы возрастает.

В связи с этим, целью бакалаврской работы является расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Осуществить подбор и анализ научной и научно-технической литературы.
2. Изучить химизм образования биогаза; рассмотреть основные способы его очистки от нежелательных компонентов.
3. Разработать и дать описание технологической схеме производства биогаза: рассчитать количество субстрата, выход биогаза и основные размеры метантенка.
4. Составить материальный и тепловой балансы реактора.
5. Изучить требования безопасности и охраны окружающей среды на биогазовой установке; рассмотреть квалификационные требования, предъявляемые к работнику биогазовой станции.

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>				У	6	63
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>						
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Свойства биогаза

Биогаз – вид биотоплива, получаемый в результате микробного разложения биомассы различного состава. Биогаз представляет собой горючую газовую смесь без запаха, имеющую в своем составе от 55 % до 85 % метана и от 15 % до 45 % углекислого газа. Помимо метана, биогаз содержит в себе незначительные количества сероводорода, водорода и азота [1, 2].

Биогаз горит синим пламенем. Его бездымное горение причиняет гораздо меньше неудобств людям по сравнению со сгоранием дров, навоза жвачных животных или кухонных отходов. По теплоте сгорания 1 м³ биогаза сопоставим с 0,8 м³ природного газа, 0,7 кг мазута, 0,6 кг бензина, 1,5 кг дров (в абсолютно сухом состоянии), 3 кг навозных брикетов [3].

1.2 Классификация биогазов

В зависимости от источника получения биогазы подразделяются на три основных вида:

- газ метантенков, получаемый при обезвреживании стоков на очистных канализационных сооружениях (БГ КОС);
- биогаз, получаемый в биогазовых установках при сбраживании отходов сельскохозяйственных производств (БГ СХП);
- газ свалок, получаемый на полигонах отходов, содержащих органические компоненты (БГ ТБО).

Усредненный состав рассматриваемых биогазов приведен в таблице 1 [1].

Газ метантенков городских канализационных очистных сооружений ха-

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	7	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

характеризуется более стабильным составом. Содержание метана в них на разных очистных сооружениях составляет от 60 % до 65 % по объему. Более значительные колебания состава газа наблюдаются при переработке отходов сельскохозяйственного производства, при этом в газе присутствует довольно высокое количество сероводорода, от которого требуется очистка.

Таблица 1 – Классификация и состав биогазов

Компоненты биогаза	Содержание компонентов, % об.		
	БГ КОС	БГ СХП	БГ ТБО
CH ₄	60-65	55-75	0-65
CO ₂	34-16	44-27	0-34
N ₂	0-3	0-3	0-82
O ₂	–	–	0-31,6
H ₂	–	0,01-0,02	0-3,6
CO	–	0,01-0,02	2,8
H ₂ S	–	< 1,0	0-0,007

Процессы образования первых двух видов биогаза протекают в стационарных устройствах. Технологические параметры процесса более или менее управляемы. Иная ситуация наблюдается на полигонах и свалках ТБО, где биоразложение слоев отходов происходит с течением времени (пригодный к использованию биогаз образуется примерно через 10 – 15 лет), причем зависит от температурно-влажностного, кислородного режимов, газопроницаемости грунта и др.

1.3 Получение биогаза

1.3.1 Исходное сырье

Исходным сырьем для получения биогаза служит большое количество органических отходов: твердые и жидкие отходы агропромышленного комплекса, сточные воды, твердые бытовые отходы, отходы деревообрабатывающей промышленности. При переработке 1 т твердых бытовых отходов органического происхождения можно получить от 45 до 100 м³ биогаза. Так, 1 т свежих отходов крупного рогатого скота и свиней при влажности 85 % дают от 45

до 60 м³ биогаза, 1 т куриного помета при влажности от 75 % до 100 м³ биогаза [3].

Выход биогаза на 1 кг сухого сырья представлен в таблице 2 [4].

Таблица 2 – Выход биогаза на 1 кг сухого вещества

Тип сырья	Выход газа на 1 кг сырья, м ³	Содержание метана, %
Отходы КРС	0,25-0,34	65
Свинные отходы	0,34-0,58	65-70
Птичий помет	0,31-0,62	60
Сточные воды	0,31-0,74	70
Трава	0,28-0,63	70

В настоящее время наиболее эффективным является использование отходов сельскохозяйственного производства. Продукты жизнедеятельности животных богаты необходимыми для метанового брожения питательными веществами [5].

1.3.2 Химизм процесса образования биогаза

Биогаз является конечным продуктом обмена веществ бактерий, образующимся вследствие разложения ими органического субстрата. Процесс деградации можно разделить на четыре этапа, в каждом из которых принимают участие разнообразные виды бактерий. Продукты характерные для каждой стадии представлены в таблице 3 [1, 6].

Гидролиз. На данном этапе комплекс высокомолекулярных органических веществ, включающих углеводы, белки и жиры гидролизуются на моносахариды, аминокислоты и жирные кислоты [6]. Длительность фазы составляет до трех дней в биореакторах, на очистных сооружениях и около одного года в полигонах и свалках ТБО [7].

Ацидогенез. Образованные во время предыдущей стадии простые составляющие разлагаются на органические кислоты (уксусная, пропионовая, масляная), спирт, альдегиды, водород, диоксид углерода, а также такие газы как аммиак и сероводород. Этот процесс протекает до тех пор, пока развитие

бактерий не замедлится под воздействием образованных кислот. Реакции сбраживания представлены ниже:



Таблица 3 – Характеристика фаз разложения органических отходов

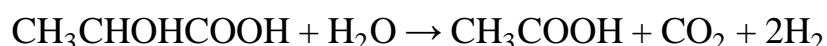
Номер и название фазы	Род микроорганизмов, участвующих в данной фазе	Продукты (в том числе промежуточные), характерные для данной стадии разложения
I – Гидролиз	Бактерии Clostridium, Bacteroides, Acetivibrio, Eubacterium, Bacillus, Lactobacillus и др.	Углекислый газ, вода, жирные кислоты, аминокислоты, низкомолекулярные спирты, глицерин, аммиак, серный газ, гликольальдегид
II – Ацидогенез	Бактерии Bacillus, Pseudomonas, Sarcina, Micrococcus и др.	Органические кислоты, спирт, альдегиды, водород, диоксид углерода, аммиак и сероводород
III – Ацетогенез	Бактерии Syntrophobacter, Syntrophomonas, Desulfovibrio и др.	Уксусная кислота, углекислый газ, вода, водород
IV – Метаногенез	Бактерии Methanobacterium, Methanococcus, Methanospirillum, Methanotrix и Methanosarcina	Метан, углекислый газ, вода

Ацетогенез. На данном этапе ацетогенные бактерии сбраживают органические кислоты и нейтральные соединения до водорода и уксусной кислоты.

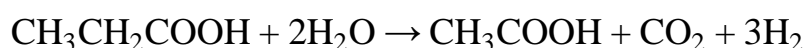
Реакции проходят по следующим уравнениям:

Окисление органических кислот:

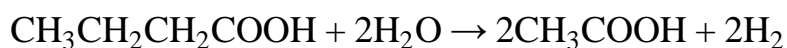
а) молочной



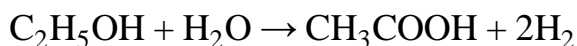
б) пропионовой



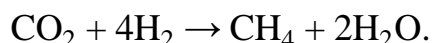
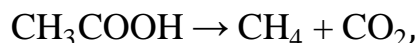
в) масляной



Окисление спиртов:



Метаногенез. Во время данной фазы происходит образование метана двумя основными способами – расщеплением ацетата и восстановлением диоксида углерода водородом. При этом первым способом образуется 64 % метана, вторым 36 %:



Большинство метаногенных бактерий относятся к мезофильной или термофильной группе. При температуре ниже 33 °С метаногенез значительно снижается, а ниже 10 °С практически прекращается. При температуре от 3 °С до 4 °С микроорганизмы выживают, но прекращают свою жизнедеятельность. Если температура окружающей среды становится ниже 10 °С, то поддержание благоприятной температуры для метаногенеза осуществляется за счет тепловыделений от анаэробных процессов.

1.3.3 Классификация биогазовых установок

При классификации биогазовых установок выделяют следующие критерии: способ подачи сырья (периодический или проточный), тип перемешивания (полное или пробочное проталкивание), одно- или многоступенчатая система [8].

Периодическая подача сырья. Данный метод характеризуется заполнением метантенка за одну операцию. Субстрат при этом не добавляют и не удаляют. После брожения реактор высвобождается. Часть сброженного субстрата возвращают обратно в метантенк для введения бактерий, тем самым увеличивая синтез биогаза.

Проточная подача сырья. При таком методе загрузки сырье подается малыми порциями. Объем каждой новой порции равен объему отведенного

сброженного субстрата. Достоинством метода является стабильный выход биогаза в сравнении с установками периодической загрузки.

Полное перемешивания субстрата. Установки, работающие по данному способу, предусматривают смешение в реакторе сразу свежего и сброженного субстрата. Часть сырья при этом отводится из метантенка.

Пробочное проталкивание субстрата. В этом способе субстрат в виде пробки проталкивается в продольном направлении по метантенку. Чтобы повысить эффективность сбраживания после реактора может быть предусмотрен дображиватель.

Одно- или многоступенчатая система. Одноступенчатая система предполагает прохождения всех стадий брожения в одном реакторе. При многоступенчатом способе каждая стадия протекает в разных реакторах последовательно.

1.3.4 Факторы, влияющие на процесс

Для эффективного функционирования микроорганизмов, необходимо создание определенных условий [8]. Условиями успешного разложения сырья являются:

- Определенный уровень влажности. Бактерии могут жить, питаться, размножаться и производить биогаз только во влажной среде.
- Отсутствие света. Свет замедляет процесс роста и размножения микроорганизмов.
- Температура. Повышение температуры увеличивает скорость разложения субстрата.
- Оптимальный уровень кислотности. Увеличение или уменьшение уровня кислотности приводит к замедлению метаногенеза. Для метаногенных микроорганизмов характерна нейтральная или слабощелочная среда с рН от 6,8 до 8.
- Загрузка свежего сырья. В свежем субстрате содержатся требуемые для роста микроорганизмов питательные вещества.

– Измельчение субстрата. При увеличении площади поверхности сырья брожение протекает быстрее. При этом субстрат лучше нагревается и не подвергается свойлачиванию.

– Отсутствие вторичных компонентов. Серные соединения, эфирные масла (корки цитрусовых, чеснок), цианиды и танины негативно влияют на сообщество микроорганизмов.

1.3.5 Классификация реакторов

Метантенки классифицируются по способам сбора биогаза, по конструкционным материалам, горизонтальному или вертикальному расположению, подземной или наземной конструкции [9].

1. По способам сбора биогаза

– Баллонные реакторы могут быть изготовлены из пластика или резины. Такой тип реактора выполняет сразу две функции – непосредственно метантенка и газгольдера. Достоинством аппарата является несложная конструкция, низкая стоимость, простота очистки, высокие температуры брожения, легкая загрузка и выгрузка субстрата. Среди недостатков выделяют короткий срок службы (до 5 лет) и высокую чувствительность к внешним факторам;

– Реакторы с фиксированной крышей состоят из закрытого купольного реактора и компенсирующей емкости. Газ собирается в куполе реактора. При загрузке следующей порции сырья, сброженный субстрат выталкивается в компенсирующий резервуар. С увеличением давления газа в куполе повышается уровень обрабатываемого сырья в компенсирующей емкости;

– Реакторы с плавающей крышей представляют собой метантенк, совмещенный с подвижным куполом. Купол находится в сырье или в специальном кармане для воды. При скоплении газа давление в куполе увеличивается, и он начинает подниматься. Благодаря подвижному куполу можно определить объем газа по высоте, что упрощает ежедневные операции, связанные с обслуживанием установки.

2. Горизонтальные и вертикальные реакторы

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

Место расположения реактора зависит от способа загрузки субстрата и наличия достаточного пространства. Вертикальные реакторы применяют при периодической загрузке сырья и отсутствии свободной территории. Горизонтальные реакторы наиболее предпочтительно использовать при проточном методе подачи субстрата.

3. Подземные и наземные реакторы

При выборе места установки такого типа реактора необходимо учитывать топографию и использовать ее для оптимизации работы. Например, удобно располагать реактор на склоне, чтобы загрузочное отверстие для исходного сырья находилось достаточно низко, сброженный субстрат перемещался за счет легкого наклона к выгрузочному отверстию, которое находилось бы на небольшой высоте для удобства загрузки в транспортные средства.

Другим фактором, который следует учитывать при выборе типа реактор, является улучшенная теплоизоляция подземных сооружений, в том числе слабее колебание суточных температур в процессе ферментации сырья, поскольку температура почвы на глубине более одного метра остается неизменной.

4. По конструкционным материалам реактора

– Кирпичные реакторы сооружаются с фиксированным или плавающим куполом и имеют округлую форму. Преимущества: низкие начальные капиталовложения и долгий срок эксплуатации, нет движущихся или ржавеющих частей. Недостатки: кирпичный метантенк требует специальных покрытий для обеспечения герметичности;

– Бетонные реакторы имеют цилиндрическую форму. Обычно они сооружаются под слоем грунта. Преимуществами таких установок являются: низкие затраты на строительство и материалы, возможность массового производства. Недостатки – большой объем потребления высококачественного бетона, необходимость специальных мер для обеспечения герметичности газгольдера;

– Металлические реакторы являются самыми простыми в изготовлении.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

Они герметичны и выдерживают высокие давления. Недостатком является дороговизна металла и необходимость ухода для предотвращения коррозии.

1.3.6 Основное оборудование биогазовой установки

1. Метантенк

На рисунке 1 приведены схемы метантенков.

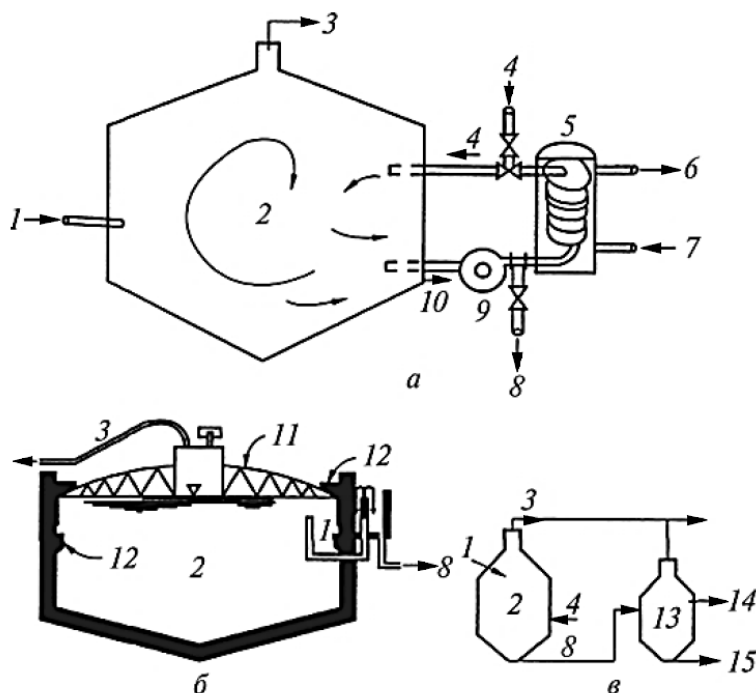


Рисунок 1 – Схема метантенков:

а – с жестким перекрытием, б – с плавающим перекрытием,

в – двухступенчатые метантенки: 1,4 – подача осадка; 2 – корпус;

3 – удаление газа; 5 – теплообменник; 6 – охлажденная вода; 7 – горячая вода;

8 – сброженный осадок; 9 – насос; 10 – осадок на рециркуляцию и удаление;

11 – плавающее перекрытие; 12 – ограничители; 13 – метантенк второй ступени;

14 – удаление иловой воды; 15 – удаление осадка из второй ступени

Метантенк – герметичный резервуар, обеспечивающий сбраживание осадков при оптимальной температуре без доступа кислорода воздуха. Метантенки представляют железобетонные или металлические емкости с теплоизоляционным покрытием. Они могут быть цилиндрическими, прямоугольными,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

шаро- и яйцеобразными резервуарами. Последние позволяют легче удалять из метантенков оседающий песок.

Каждый метантенк оборудуется трубопроводами подачи исходного сырья и удаления сброженного осадка, системами нагревания, перемешивания, сбора и удаления газа. Субстрат загружается в верхнюю часть метантенка и выгружается из его нижней части. Для предотвращения оседания песка и лучшего перемешивания осадка его загрузку и выгрузку производят одновременно из трубопроводов, расположенных на разных уровнях. Для перемешивания сырья применяют насосы, гидроэлеваторы, пропеллерные мешалки и др. Эффективно перемешивание субстрата с помощью рециркуляции образующегося в метантенках газа. С целью предотвращения поступления воздуха иногда применяют метантенки с плавающим перекрытием (рисунок 1, б). Плавающее перекрытие поднимается при загрузке осадка и опускается при его выгрузке, обеспечивая герметичность конструкции с одновременным сбором и отведением газа с поверхности.

Поскольку метаногенез протекает без выделения тепла, требуется обогрев метантенков. Подогрев биореактора выполняется следующими способами:

- устройством системы трубопроводов с циркулирующей горячей водой (змеевик) под основанием биореактора;
- прокладкой греющего электрокабеля вокруг корпуса биореактора;
- помещением электрических тэнов непосредственно в биомассу.

2. Системы хранения биогаза

Для выравнивания неравномерности производства и потребления биогаза используются газгольдеры.

Принципиальная схема газгольдеров низкого давления приведена на рисунке 2.

Биогаз в зависимости от его количества и направления последующего использования можно хранить под разным давлением, соответственно, и

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

газохранилища называются газгольдерами низкого (до 5 кПа), среднего (от 5 до 300 кПа) и высокого (от 0,3 до 1,8 МПа) давления.

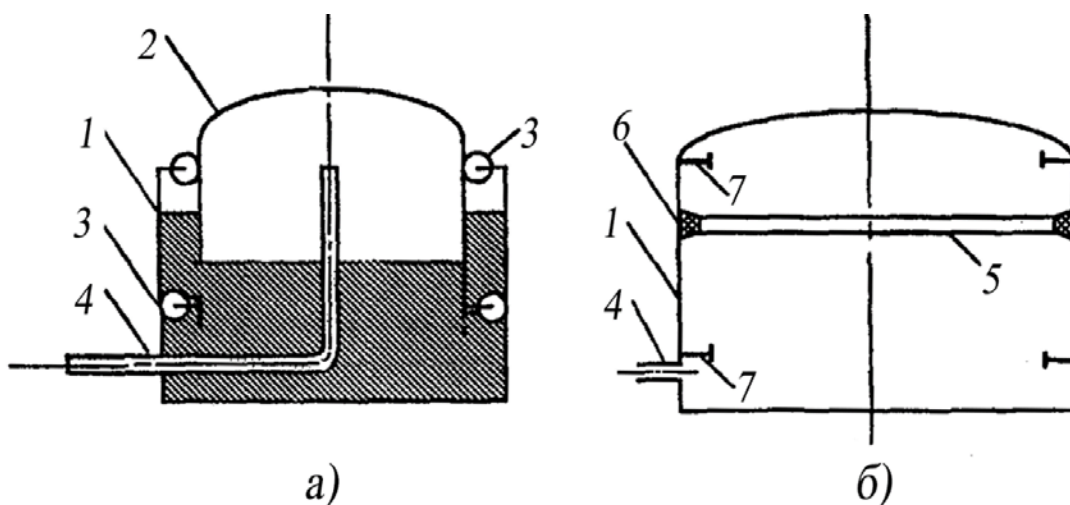


Рисунок 2 – Принципиальная схема газгольдеров низкого давления:
 а – мокрый; б – сухой; 1 – резервуар; 2 – колокол; 3 – ролики;
 4 – газопровод; 5 – шайба; 6 – уплотнение; 7 – ограничитель хода

В практике наиболее часто используют газгольдеры низкого давления, предназначенные для хранения газа при незначительно колеблющемся давлении и значительно изменяющемся объеме газа.

Газгольдеры среднего и высокого давления устраиваются по принципу неизменного объема, но меняющегося давления [10]. Они бывают цилиндрические и сферические. Цилиндрические газгольдеры имеют геометрический объем от 50 до 270 м³.

1.4 Доведение биогаза до товарного качества

Условия получения биогазов и наличие в их составе вредных и балластных примесей делают необходимой предварительную обработку биогаза перед применением [1]. Основные этапы подготовки газа к использованию:

- отделение влаги и взвешенных частиц;
- удаление сероводорода;
- удаление галогенсодержащих соединений;

- удаление углекислого газа;
- сжатие или сжижение (при использовании в качестве моторного топлива).

Кроме метана, углекислого газа в биогазах различного происхождения присутствуют балластные и вредные примеси. К нежелательным компонентам относят водяной пар, сероводород и галогенсодержащие углеводороды. Осушку биогаза необходимо предусматривать при использовании всех видов биогазов во избежание коррозии. Сероводород встречается в основном в биогазах с сельскохозяйственных биогазовых установок и с полигонов ТБО.

Хлор- и фторсодержащие углеводороды представляют опасность из-за появления диоксинов и фуранов при недостаточно высоких температурах горения и вместе с сероводородом приводят к коррозионной опасности вследствие образования соляной и плавиковой кислот при конденсации продуктов сгорания в агрегате.

В зависимости от направления использования газа степень очистки может быть различной. Требования по очистке биогаза представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Требования по очистке биогаза

Способ использования биогаза	Необходимость очистки от			
	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Взвешенных частиц
Сжигание в бытовых газовых плитах	Да	Нет	Нет	Да
Сжигание в горелках инфракрасного излучения	Да	Нет	Нет	Да
Сжигание в отопительных котлах (подготовка горячей воды)	Желательно	Нет	Нет	Да

Отделение взвешенных частиц необходимо во всех случаях с целью предотвращения засорения арматуры и газопроводов. Чаще всего достаточна грубая фильтрация в гравийном фильтре или в центробежном сепараторе. Иногда применяют тонкие фильтры из стекловолокна.

1.4.1 Осушка биогаза

Биогаз выходит из биореактора при температуре процесса брожения в водонасыщенном состоянии. До момента использования газ значительно охлаждается, из-за чего выпадает водный конденсат и возникает опасность замерзания в холодный период года. В связи с этим биогаз должен быть осушен.

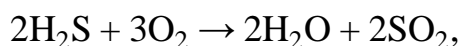
Наиболее дешевым способом осушки является метод охлаждения, когда газ пропускают через влагоотделитель, служащий одновременно для осушки и отделения взвешенных частиц.

Осушка методом охлаждения примерно до 10 °С достаточна для распространенных способов использования газа, например, для получения тепла при сжигании и выработке электроэнергии. При необходимости более глубокой осушки применяют адсорбционную осушку или осушку жидкими поглотителями влаги.

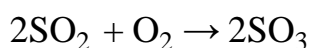
1.4.2 Обессеривание и очистка от галогенсодержащих компонентов

Содержание сероводорода в биогазе может достигать 3 %. Избыточный сероводород совместно с водяными парами и, особенно, в комбинации с углекислым газом, оказывает корродирующее воздействие на металлические поверхности газооборудования, причем скорость коррозии может достигать от 0,5 до 1 мм/год [11, 12].

При сжигании биогаза сероводород переходит в оксиды серы:



а при избытке воздуха:



Эти газы, взаимодействуя с водяным паром, образуют серную и сернистую кислоты, которые также являются коррозионно-активными. Кроме того, H_2S , SO_2 и SO_3 – высокотоксичные газы. Таким образом, очистка от сероводорода необходима для снижения токсичности и запаха биогаза, вредных выбросов с продуктами сгорания, коррозионной опасности из-за наличия серосодер-

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

жащих газов и кислот [1, 2].

Необходимость удаления хлор- и фторсодержащих углеводородов и сернистых соединений после осушки газа в различных блоках очистки зависит от способа утилизации газа. При использовании биогаза как моторного топлива содержание общего хлора не должно превышать 50 мг/м³, а общего фтора – 10 мг/м³; для безвредной утилизации в топочных устройствах при температуре горения более 1200 °С и времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне 0,3 с концентрация общего хлора не должна превышать 200 мг/м³, общего фтора – менее 20 мг/м³ [13].

Очистка от сероводорода и галогенсодержащих углеводородов производится на действующих установках различными способами: адсорбционным или абсорбционным. Выбор способа обессеривания зависит от вида биогаза (содержания H₂S), количества и давления газа, требуемой степени очистки и температуры процесса.

1. Адсорбция активированным углем

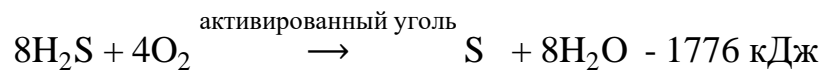
При использовании этой технологии удаление органических соединений происходит на насадке с активированным углем. Адсорбция высоко-, средне- и низкокипящих галогенсодержащих углеводородов происходит по двухступенчатой технологии очистки. Обе ступени работают под давлением около 150 кПа.

Если возможен скачкообразный выход газа (с переменным расходом), то предлагается многоступенчатая конструкция адсорбционной установки. Для защиты установки и повышения эффективности адсорбции галогенсодержащих соединений может потребоваться удаление сероводорода.

Принцип действия адсорбционной установки показан на рисунке 3.

На адсорбционной ступени очистки сероводород окисляется на специально обработанном активированном угле до элементарной серы, которая сорбируется в порах активированного угля [2]. Окисление осуществляется по схеме:

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20



Образовавшаяся элементарная сера адсорбируется внутренними поверхностями пор активированного угля, а водяные пары – насыщают очищенный биогаз. Потребность в кислороде, требуемом для каталитической реакции, можно покрыть за счет подмешивания воздуха. Благодаря большой сорбционной способности активированного угля (0,3 кг серы на 1 кг активированного угля) при длительной эксплуатации на одной загрузке эту адсорбцию можно осуществлять непрерывно. Реакционная способность сорбента восстанавливается методом термической регенерации.

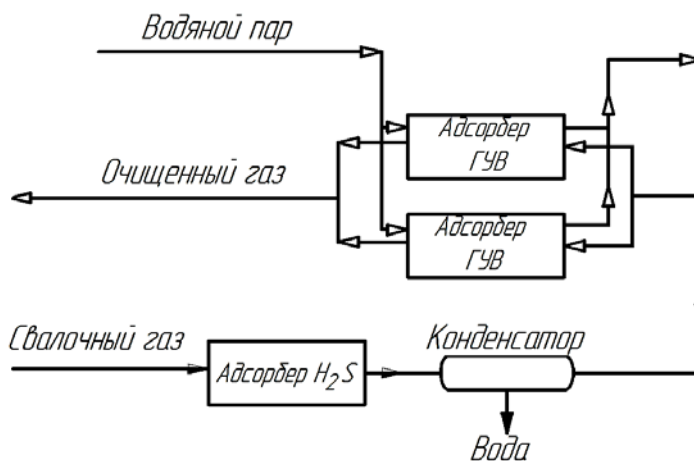


Рисунок 3 – Принципиальная схема адсорбционной установки очистки биогаза

Перед следующими этапами обработки производится осушка газа, например, путем охлаждения. Это требуется по двум причинам. Во-первых, начиная с относительной влажности газа около 40 % (в зависимости от температуры), водяной пар адсорбируется на активированном угле, из-за чего насадка активированного угля теряет активность по отношению к галогенсодержащим органическим соединениям. Во-вторых, при конденсации водяного пара растворяются органические компоненты, обладающие высокой

коррозионной активностью. Таким образом, конденсат может повредить элементы оборудования и сократить срок службы установки.

На второй технологической ступени, служащей для удаления тяжелых и галогенсодержащих углеводородов, газ снова пропускается через насадку с активированным углем. В отличие от удаления серы, здесь не происходит химического преобразования. Галогенсодержащие соединения удерживаются на угле только физически, под действием Ван-дер-Ваальсовых сил. Это означает, что после насыщения активированный уголь не нужно заменять, а нужно только очистить его от осевших галогенсодержащих соединений путем десорбции. Регенерация загруженного активированного угля производится путем продувки горячим водяным паром или инертным газом. Перед повторным использованием регенерированный активированный уголь сушится и охлаждается. Смесь пара и галогенсодержащих соединений, образующаяся при регенерации, конденсируется, и конденсат затем отводится в систему водоотведения.

2. Адсорбция оксидом железа(III)

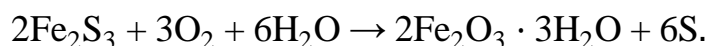
К адсорбционным способам очистки относится и взаимодействие сероводорода с оксидом железа(III) с образованием сульфида железа [2]:



Реакция сопровождается тепловыделением, которое также частично осушает биогаз.

Оптимальная влажность сорбента от 5 % до 20 % обеспечивается тем, что биогаз насыщен водяным паром.

Регенерация осуществляется путем продувки воздухом, при этом образуется элементарная сера, которая откладывается на поверхности поглотителя:



На рисунке 4 приведена схема установки для очистки биогаза от H_2S [1].

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

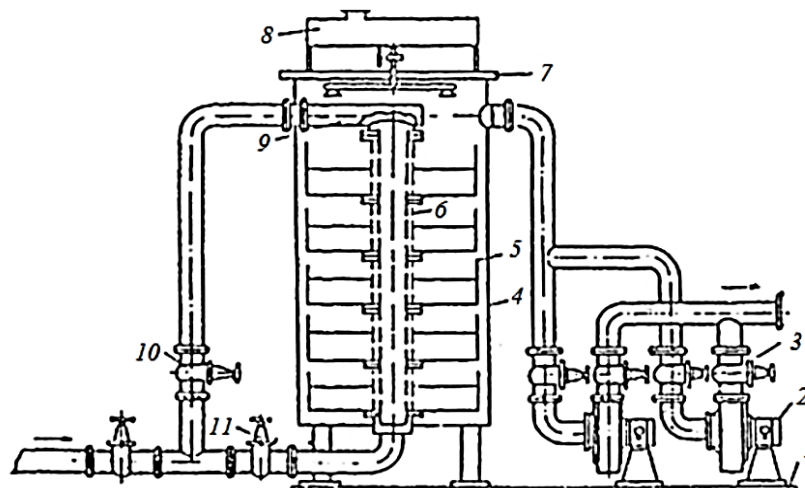


Рисунок 4 – Установка для очистки биогаза от сероводорода:

1 – рама; 2 – вентилятор; 3, 10, 11 – задвижки; 4 – корпус; 5 – контейнеры;
6 – ствол; 7 – крышка; 8 – бак; 9 – трубопровод

При длительном использовании поглотителя отложения серы загрязняют поверхность Fe_2O_3 настолько, что массу требуется заменить. Сорбционная способность Fe_2O_3 сильно зависит от начальной концентрации сероводорода в биогазе. Максимальное количество сероводорода, улавливаемое 1 кг наполнителя, составляет 250 г и после каждой регенерации снижается примерно на 15 %.

Для непрерывного процесса используются двухкамерные башни, работающие по системе переменного действия. Основным недостатком рассмотренных способов является выделение тепла во время регенерации и, как следствие, опасность воспламенения.

3. Абсорбция в промывочном растворе

Другой способ отделения тяжелых и галогенсодержащих углеводородов – абсорбционная очистка, основанная на разной растворимости компонентов газа в воде или водных растворах различных химических соединений. При использовании данной технологии галогенсодержащие соединения абсорбируются промывочным раствором, состоящим из смеси органических

растворителей. При этом эффективность очистки от соединений хлора достигает более 95 %.

Процесс жидкостной абсорбции происходит в противоточной колонне. Содержащий вредные примеси газ подается в колонну с насадкой, омываемой растворителем при температуре не более 10 °С. Абсорбент непрерывно циркулирует по внутреннему контуру между абсорбционной колонной и десорбером. В блоке десорбера абсорбированные в растворителе примеси при температуре десорбции от 80 °С до 90 °С и абсолютном давлении 500 кПа вновь переходят в парообразное состояние. Образующийся в отстойнике абсорбент после охлаждения вновь направляется в колонну абсорбера. Углеводороды, находящиеся в паровой фазе, сжижаются под разрежением в процессе трехступенчатой конденсации. Эта жидкость является чистым концентратом примесей и после обработки удаляется. Благодаря достаточно низкой температуре регенерации (около 90 °С) не образуется соляная кислота, поэтому не требуется особых коррозионно-стойких конструкций установки.

Преимуществами способа является нечувствительность к колебаниям расхода обрабатываемого газа и концентрациям вредных примесей в нем, небольшие потери давления, а также тот факт, что количество удаляемого осадка соответствует количеству вредных примесей в газе, т. е. отсутствие регенерационного конденсата. В качестве недостатков следует отметить относительно дорогое оборудование трехступенчатой вакуумной конденсации. Кроме этого, при высоких концентрациях сероводорода необходимо предусматривать отдельный технологический этап его удаления.

4. Каталитическое окисление

Способ каталитической обработки подходит для селективной и одновременной обработки газа от галогенсодержащих соединений и сероводорода. Названные вредные вещества каталитически преобразуются в соляную и плавиковую кислоты и диоксид серы. Эти реакции протекают в отсутствие катализатора только при температуре 1000 °С или давлениях порядка 100 МПа. В

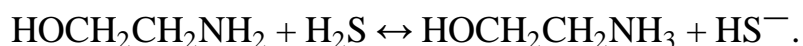
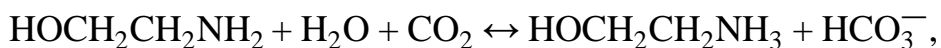
					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24

присутствии катализаторов условия реакций более мягкие, но широкого использования этот способ пока не получил.

1.4.3 Удаление углекислого газа

Углекислый газ удаляют с целью обогащения биогаза. Для отделения углекислого газа применяется моноэтаноламиновая отмывка, дальнейшее обогащение достигается подмешиванием к очищенному газу пропана. В этом же процессе достигается очистка от сероводорода [1, 14].

Этаноламиновый процесс основан на взаимодействии водного раствора моноэтаноламина (НО-СН₂СН₂-NH₂) с СО₂ или Н₂S. В результате получаются водорастворимые соли:



Эти реакции обратимы, их равновесие может быть смещено при регулировании температуры. Также на равновесие системы оказывает некоторое влияние парциальное давление кислых газов и другие факторы. Температура контактирования обычно от 20 °С до 25 °С, давление – от атмосферного до величин, превышающих 7 МПа. Способ моноэтаноламиновой очистки обеспечивает полное вымывание СО₂, Н₂S до содержания 0,001 % по объему.

Схема установки очистки биогаза с регенерацией моноэтаноламина приведена на рисунке 5 [2].

Неочищенный газ по газопроводу 1 поступает в абсорбер 2 и выходит в газопровод 3. В абсорбер подается регенерированный раствор этаноламинов, поглощающий сероводород и углекислый газ. Продукты химической реакции через теплообменник 5 поступают в выпарную колонну 7, где происходит их подогрев. Дополнительный подогрев проводится также в кипятильнике 10. В выпарной колонне 7 при температуре около 100 °С происходит регенерация моноэтаноламина. В холодильнике 6 пары охлаждаются и в сепараторе 8 разделяются на газы и конденсат. Конденсат отсасывается насосом 9 и подается в

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

выпарную колонну 7, а газы идут на дальнейшую переработку или обезвреживаются (сжигаются). Регенерированный раствор моноэтаноламина из выпарной колонны 7 подается насосом 11 в абсорбер 2. При этом раствор охлаждается в теплообменнике 5 и холодильнике 4. Основные достоинства этого способа заключаются в достаточно высокой степени очистки (до 99 %), регенерируемости, незначительных потерях реагента, компактности установки, автоматизации процесса.

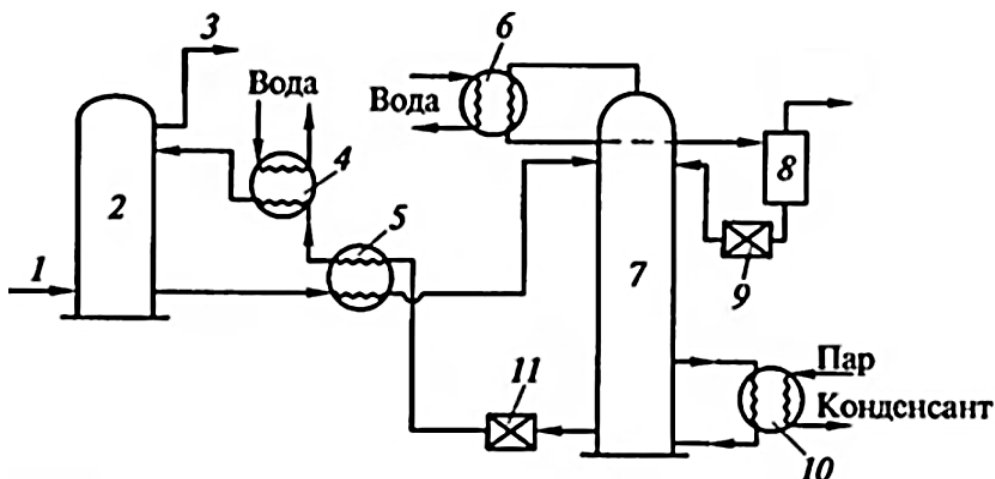


Рисунок 5 – Схема очистки газа от сероводорода и углекислого газа с регенерацией моноэтаноламина:

1, 3 – газопроводы; 2 – абсорбер; 4, 6 – холодильники; 5 – теплообменник; 7 – выпарная колонна; 8 – сепаратор; 9, 11 – насосы; 10 – кипятильник

Наиболее простым и дешевым способом отделения CO_2 и частичного отделения H_2S является промывка водой. В абсорбере при избыточном давлении порядка 1 МПа углекислый газ поглощается водой. После снижения давления происходит последующая осушка газа с достаточно низкой точкой росы. Насыщенная углекислым газом вода регенерируется воздухом.

Способ мембранного разделения основан на различной проницаемости метана и углекислого газа через мембрану. Мембранные установки имеют высокую стоимость, но это компенсируется впоследствии низкими

энергозатратами. Схема разделения биогаза с помощью мембранных контактеров приведена на рисунке 6 [1].

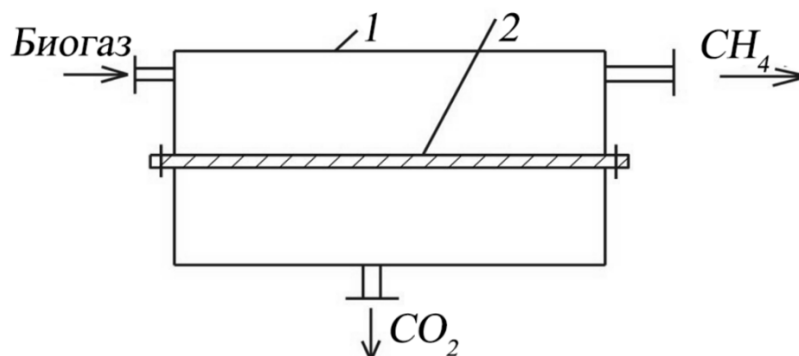


Рисунок 6 – Разделение биогаза с помощью мембранных контактеров:

1 – аппарат; 2 – мембрана

Процесс прохождения газа через мембрану описывается отдельными этапами: адсорбция компонента из газовой фазы, диффузия через мембрану и десорбция из мембраны в газовую фазу.

1.4.4 Сжатие биогаза

В транспортных средствах в качестве горючего можно использовать сжатый или сжиженный газ [1].

Сжатый до 2 МПа 1 м³ биогаза при температуре 0 °С уменьшится до 0,00295 м³. В баллонах высокого давления емкостью 50 л при таких условиях можно хранить 17 м³ газа, тогда как при таком же давлении и температуре 40 °С или 50 °С – только 15,5 или 14,5 м³ соответственно. Перед сжатием или сжижением газ практически полностью освобождается от углекислого газа, сероводорода и других примесей. На метане могут работать карбюраторные и дизельные двигатели, но так как метан является высокооктановым топливом, то эффективно его использование в дизельных двигателях.

1.5 Области применения биогаза

Достаточно высокое содержание метана в биогазе, а, следовательно, и высокая теплота сгорания, предоставляют широкие возможности применения биогаза [14, 15]. Основные направления утилизации энергии биогаза:

- для получения электроэнергии;
- для покрытия собственных энергетических нужд биогазовых установок;
- для термического обезвреживания органических отходов;
- в качестве топлива для получения горячей воды или пара на покрытие технологических нужд очистных сооружений, сельскохозяйственных производств, полигонов ТБО [16];
- в качестве топлива для получения теплого воздуха или горячих газов на сушку сельхозпродукции или обогрев сельскохозяйственных зданий и сооружений (теплиц);
- в качестве моторного топлива;
- для подкормки растений углекислым газом;
- для сушки сброженного осадка;
- для подпитки локальных сетей природного газа.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Характеристика сырья

Исходным сырьем для биогазовой установки служат все виды органических отходов крестьянского или фермерского хозяйств [17].

Вид и объем подготовки сырья оказывают положительное влияние на ход процесса брожения и, следовательно, на использование энергетического потенциала субстрата [17, 18].

Сырье перед подачей в реактор должно пройти несколько этапов подготовки:

1. Сортировка и отделение посторонних веществ

Необходимость сортировки и отделения посторонних веществ зависит от происхождения и состава субстрата. Посторонние вещества, которыми чаще всего бывают камни, сепарируются преимущественно в приемной емкости, с дна которой их время от времени нужно убирать [19]. Используются также сепараторы тяжелых веществ, которые монтируются непосредственно в трубопроводах субстрата перед системой подачи. Другие посторонние вещества удаляются вручную.

2. Измельчение

С увеличением степени измельчения возрастает скорость биологического разложения. Участок измельчения твердых субстратов может располагаться перед участком подачи субстрата в приемную емкость, трубопровод или реактор. Для этого можно использовать шредеры, мельницы, дробилки, а также валы и шнеки с разрывающими и режущими приспособлениями.

3. Смешивание с жидкостью и гомогенизация

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				<i>У</i>	29	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>			<i>818-об гр.</i>			

Смешивание субстратов с жидкостью необходимо для получения перекачиваемых субстратов. Смешивание производится, как правило, в приемной емкости или других емкостях незадолго до подачи субстрата на сбраживание. В качестве жидкости для смешивания с субстратом могут использоваться жидкие остатки от брожения, технологическая вода или в исключительных случаях свежая вода.

Однородность поданного в реактор субстрата имеет большое значение для стабильности процесса брожения. При сильных колебаниях нагрузки и меняющемся составе субстрата микроорганизмы вынуждены приспосабливаться к изменяющимся условиям, что в большинстве случаев связано с уменьшением выхода газа. Гомогенизация субстратов производится преимущественно в приемной емкости с помощью мешалок или непосредственно в метантенке [20].

2.2 Характеристика готовой продукции

Целевым продуктом биогазовой установки является биогаз, получаемый путем анаэробной ферментации сырья.

Биогаз, при подаче в локальную сеть природного газа, должен соответствовать показателям качества товарного газа [2]:

- газ при транспортировании не должен вызывать коррозию трубопроводов, арматуры, приборов и т.п.;
- качество газа должно обеспечивать его транспортирование в однофазном состоянии;
- товарный газ не должен вызывать осложнений у потребителя при его использовании.

Показатели качества природного газа приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Требования к качеству природного газа [21, 22]

Показатель	Климатический район			
	Умеренный		Холодный	
	1.05-30.09	1.10-30.04	1.05-30.09	1.10-30.04
1	2	3	4	5
Точка росы газа по влаге, °С, не выше	минус 3	минус 5	минус 10	минус 20

1	2	3	4	5
Содержание H ₂ S, мг/м ³ , не более	7	7	7	7
Объемная доля кислорода, %, не более	0,5	0,5	1,0	1,0
Содержание механических примесей	Оговаривается отдельно в соглашениях по поставке газа			

По нормативным документам [21] и [22] к сернистым газам относятся газы с содержанием сероводорода более 0,0014 % об. (или 0,02 г/м³). Запрещается использовать их в качестве бытовых, технологических и топливных газов по санитарным требованиям и технике безопасности. Они требуют очистки от сернистых соединений.

2.3 Описание технологической схемы биогазовой установки

Технологическая схема биогазовой установки представлена на рисунке 7. Жидкий субстрат подается в метантенки М-1 и М-2 два раза в сутки при помощи шнека. Два реактора предусмотрено с точки зрения надежности эксплуатации установки. В случае останова одного работает другой. Длительность сбраживания составляет 10 суток, режим сбраживания – мезофильный (35 °С). Для интенсификации процесса метантенк оборудован мешалкой. Выделяемый биогаз накапливается в верхней части реактора под давлением до кПа. Объем реактора рассчитан так, чтобы при максимальном заполнении часть объема (до 15 %) использовалась как совмещенный газгольдер. Отработанный субстрат отводится в емкость для сброженного субстрата Е-1 [13].

Далее биогаз сжимается до 0,2 МПа и проходит через узел подготовки до товарного качества. Насыщенный водяными парами газ охлаждается в теплообменнике Т-1 до 3 °С. В результате водяные пары конденсируются, собираются внутри охлаждающей камеры, а затем отводятся в канализацию. После осушенный биогаз очищается от сероводорода в адсорберах А-1 и А-2. Для очистки газа предусматривается каталитический способ, основанный на реакции с активированным углем. Температура реакции составляет 40 °С. Роль

активированного угля двойка: он является катализатором окисления сероводорода и адсорбентом серы, образующейся в процессе окисления. Длительность работы угля до регенерации – от одной до двух недель, а срок службы – около двух лет. Реакционная способность катализатора восстанавливается методом термической регенерации. Температура регенерации – около 300 °С [2]. Образующаяся элементарная сера впоследствии утилизируется.

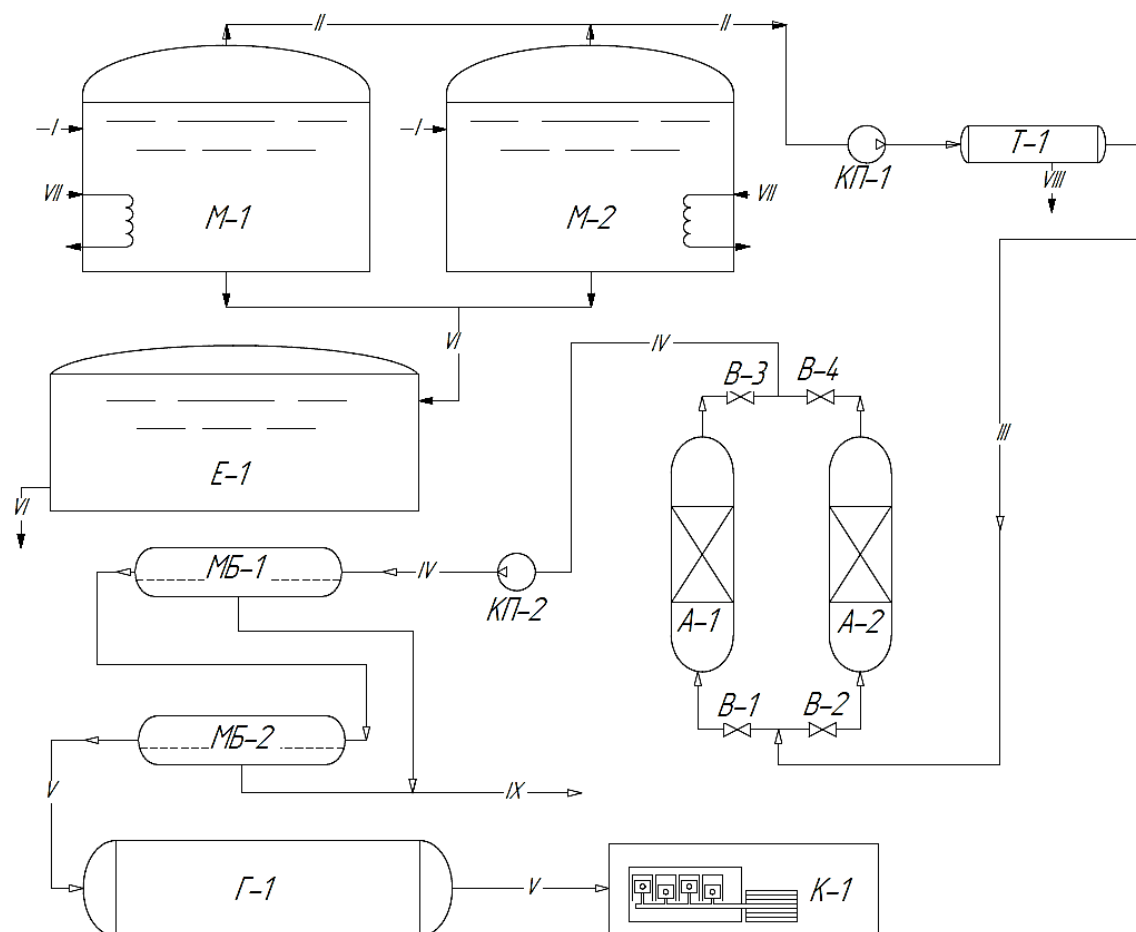


Рисунок 7 – Технологическая схема биогазовой установки:

М-1-2 – метантенк; Т-1 – теплообменник; КП-1-2– компрессор;
 В-1-4 – вентиль; А-1-2 – адсорбер; МБ-1-2 – мембрана; Г-1 – газгольдер;
 К-1 – когенератор; Е-1 – емкость сброженного субстрата;
 I – свежий субстрат; II – биогаз; III – осушенный биогаз;
 IV – осушенный и очищенный биогаз; V – биометан; VI – сброженный суб-
 страт; VII – теплоноситель; VIII – конденсат; IX – углекислый газ

После осушенный и очищенный от сероводорода газ разделяется на двухступенчатой полимерной мембране МБ-1 и МБ-2. Процесс мембранного разделения газов основан на их различной способности проходить через полупроницаемую перегородку. Газовая смесь предварительно компримируется до 1,6 МПа и подается в напорный канал: легкопроникающий метан проходит через мембрану, а труднопроникающий углекислый газ – выводится из разделительного аппарата. Два мембранных модуля позволяют достичь концентрации метана до 98 %.

Далее биометан накапливается в газгольдере высокого давления Г-1. Подготовленный к применению газ подается в когенератор К-1 для обеспечения установки электроэнергией и теплом. Часть биогаза также может использоваться для подпитки сетей природного газа.

2.4 Расчет биогазовой установки

2.4.1 Определение количества субстрата и выхода биогаза

Методика расчета биогазовой установки приведена в источнике [1].

Исходным сырьем биогазовой установки служат органические отходы, поступающие с мега-фермы АО «Луч», расположенной в селе Ивановка Амурской области. поголовье крупного рогатого скота приведено в таблице 6.

Таблица 6 – поголовье скота АО «Луч»

Группа животных	Количество голов на 31 января 2022 г.
Коровы	1200
Коровы на откормке	77
Быки-производители	1
Нетели	316
Телята возрастом до 12 месяцев	642
Телята возрастом от 12 до 18 месяцев	615
Итого	2853

Количество жидких отходов L , м³, выходящих из животноводческих ферм и комплексов, определяется по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^N Q_{Ki} + G_1 + G_2 + G_3, \quad (1)$$

где N – число линий удаления субстрата;

Q_{Ki} – количество отходов, m^3 , от животных, обслуживаемых одной линией удаления отходов, принимается по технологическим нормам проектирования;

G_1 – количество воды, m^3 , требуемое для функционирования одной линии удаления отходов;

G_2 – количество воды или жидкой фракции субстрата, требуемое для смыва осадка из каналов и проведения санитарно-ветеринарных мероприятий по окончании цикла производства, $m^3/сут$;

G_3 – количество воды или жидкой фракции субстрата, m^3 , требуемое для смыва осадка из коллекторов.

Влажность, %, жидких отходов, выходящего из комплекса:

$$W_H = \sum_{i=1}^n \frac{[Q_{Ki} \cdot W_{Ki} + 100(G_1 + G_2 + G_3)]}{Q}, \quad (2)$$

где W_{Ki} – влажность субстрата, получаемого на линии удаления, %.

Масса абсолютно сухого вещества, т:

$$S = \sum_{i=1}^n Q_{Ki} \left(1 - \frac{W_H}{100}\right). \quad (3)$$

Суточный выход биогаза $V_{\text{биогаз}}$, $m^3/сут$:

$$V_{\text{биогаз}} = L \cdot g, \quad (4)$$

где g – удельный выход биогаза, m^3 на 1 т перерабатываемого субстрата или сухого вещества;

L – суточное количество перерабатываемого субстрата (или сухого вещества), $t/сут$.

По технологическим нормам определяется количество субстрата (таблица 7). Количество измельченной подстилки для крупного рогатого скота принимается равным 3 кг/сут, для телят 2 кг/сут [1].

Общая масса отходов и соломы:

– на одну корову

$$35 + 20 + 3 = 58 \text{ кг};$$

– на одну корову на откормке

$$40 + 20 + 3 = 63 \text{ кг};$$

– на одного быка-производителя

$$30 + 10 + 3 = 43 \text{ кг};$$

– на одну нетель

$$20 + 7 + 3 = 30 \text{ кг};$$

– на одного теленка возрастом до 12 месяцев

$$10 + 4 + 2 = 16 \text{ кг};$$

– на одного теленка возрастом от 12 до 18 месяцев

$$20 + 7 + 2 = 29 \text{ кг}.$$

Таблица 7 – Нормы выхода отходов крупного рогатого скота

Половозрастные группы животных	Показатели	Состав отходов		
		Всего отходов	В том числе	
			Твердые	Жидкие
Коровы	Масса, кг	55	35	20
	Влажность, %	88,4	85,2	94,2
Коровы на откормке	Масса, кг	62	40	20
	Влажность, %	88,0	85,1	94,1
Быки-производители	Масса, кг	40	30	10
	Влажность, %	86,0	83,0	95,0
Нетели	Масса, кг	27	20	7
	Влажность, %	86,7	83,5	96,0
Телята возрастом до 12 месяцев	Масса, кг	14	10	4
	Влажность, %	85,9	83,5	96,5
Телята возрастом от 12 до 18 месяцев	Масса, кг	27	20	7
	Влажность, %	86,7	83,5	96,0

Определим усредненную влажность всей биомассы.

Количество сухого вещества в твердых и жидких отходах рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{св}} = m_{1,2} \frac{(100 - x_{1,2})}{100}; \quad (5)$$

где $m_{1,2}$ – норма выхода твердого или жидкого субстрата, кг/сут;

$x_{1,2}$ – влажность субстрата, %.

Количество сухого вещества в твердых отходах:

– коров

$$35 \frac{(100 - 85,2)}{100} = 5,18 \text{ кг};$$

– коров на откормке

$$40 \frac{(100 - 85,1)}{100} = 5,96 \text{ кг};$$

– быка-производителя

$$30 \frac{(100 - 83)}{100} = 5,1 \text{ кг};$$

– нетели

$$20 \frac{(100 - 83,5)}{100} = 3,3 \text{ кг};$$

– телята, возрастом до 12 месяцев

$$10 \frac{(100 - 83,5)}{100} = 1,65 \text{ кг};$$

– телята, возрастом от 12 до 18 месяцев

$$20 \frac{(100 - 83,5)}{100} = 3,3 \text{ кг}.$$

Количество сухого вещества в жидких отходах:

– коров

$$20 \frac{(100 - 94,2)}{100} = 1,16 \text{ кг};$$

– коров на откормке

$$20 \frac{(100 - 94,1)}{100} = 1,18 \text{ кг};$$

– быка-производителя

$$10 \frac{(100 - 95)}{100} = 0,5 \text{ кг};$$

– нетели

$$7 \frac{(100 - 96,0)}{100} = 0,28 \text{ кг};$$

– телята, возрастом до 12 месяцев

$$4 \frac{(100 - 96,5)}{100} = 0,14 \text{ кг};$$

– телята, возрастом от 12 до 18 месяцев

$$7 \frac{(100 - 96,0)}{100} = 0,28 \text{ кг}.$$

Количество сухого вещества в измельченной подстилке рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{свп}} = m_{\text{крс,т}} \frac{(100-x)}{100}; \quad (6)$$

где $m_{\text{крс,т}}$ – количество измельченной подстилки для крупного рогатого скота или телят, кг/сут;

$x = 14$ – влажность соломы, % [6].

Тогда количество сухого вещества в подстилке:

– крупного рогатого скота

$$3 \frac{(100 - 14)}{100} = 2,58 \text{ кг};$$

– телят

$$2 \frac{(100 - 14)}{100} = 1,72 \text{ кг};$$

Общее количество сухого вещества в смеси субстрата и подстилки:

– коров

$$5,18 + 1,16 + 2,58 = 8,92 \text{ кг};$$

– коров на откормке

$$5,96 + 1,18 + 2,58 = 9,72 \text{ кг};$$

– быка-производителя

$$5,1 + 0,5 + 2,58 = 8,18 \text{ кг};$$

– нетели

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		37

$$3,3 + 0,28 + 2,58 = 6,16 \text{ кг};$$

– телята, возрастом до 12 месяцев

$$1,65 + 0,14 + 1,72 = 3,51 \text{ кг};$$

– телята, возрастом от 12 до 18 месяцев

$$3,3 + 0,28 + 1,72 = 5,3 \text{ кг}.$$

Усредненный процент сухого вещества в смеси рассчитывается по формуле:

$$\frac{m_{\text{осв}} \cdot 100}{m_1 + m_2 + m_{\text{крс,т}}}; \quad (7)$$

где $m_{\text{осв}}$ – общее количество сухого вещества в смеси отходов и подстилки, кг.

Тогда:

– коров

$$\frac{8,92 \cdot 100}{58} = 15,38 \%;$$

– коров на откормке

$$\frac{9,72 \cdot 100}{63} = 15,43 \%;$$

– быка-производителя

$$\frac{8,18 \cdot 100}{43} = 19,02 \%;$$

– нетели

$$\frac{6,16 \cdot 100}{30} = 20,53 \%;$$

– телята, возрастом до 12 месяцев

$$\frac{3,51 \cdot 100}{16} = 21,94 \%;$$

– телята, возрастом от 12 до 18 месяцев

$$\frac{5,3 \cdot 100}{29} = 18,28 \%.$$

Отсюда влажность всей массы:

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		38

– коров

$$100 - 15,38 = 84,62 \%$$

– коров на откормке

$$100 - 15,43 = 84,57 \%$$

– быка-производителя

$$100 - 19,02 = 80,98 \%$$

– нетели

$$100 - 20,53 = 79,47 \%$$

– телята, возрастом до 12 месяцев

$$100 - 21,94 = 78,06 \%$$

– телята, возрастом от 12 до 18 месяцев

$$100 - 18,28 = 81,72 \%$$

Количество смеси при влажности 90 %:

– на одну корову

$$58 \frac{(100 - 84,62)}{(100 - 90)} = 89,20 \text{ кг};$$

– на одну корову на откормке

$$63 \frac{(100 - 84,57)}{(100 - 90)} = 97,21 \text{ кг};$$

– на одного быка-производителя

$$43 \frac{(100 - 80,98)}{(100 - 90)} = 81,79 \text{ кг};$$

– на одну нетель

$$30 \frac{(100 - 79,47)}{(100 - 90)} = 61,59 \text{ кг};$$

– на одного теленка возрастом до 12 месяцев

$$16 \frac{(100 - 78,06)}{(100 - 90)} = 35,10 \text{ кг};$$

– на одного теленка возрастом от 12 до 18 месяцев

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		39

$$29 \frac{(100 - 81,72)}{(100 - 90)} = 53,01 \text{ кг.}$$

Суммарное количество субстрата влажностью 90 % составит

$$89,20 \cdot 1200 + 97,21 \cdot 77 + 81,79 \cdot 1 + 61,59 \cdot 316 + 35,10 \cdot 642 \\ + 53,01 \cdot 615 = 189204,75 \text{ кг} = 210227,5 \text{ л} = 210,23 \text{ м}^3.$$

$$V_{\text{биог}} = 210,23 \cdot 25 = 5255,75 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

2.4.2 Определение размеров биореакторов

Исходными данными для определения объема биореактора являются суточная загрузка субстрата, длительность сбраживания, периодичность загрузки и выгрузки субстрата из биореактора [1, 10].

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 каждого реактора:

$$V_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{Н}} \cdot \tau}{n}, \quad (8)$$

где $G_{\text{Н}}$ – суточная загрузка субстрата $\text{м}^3/\text{сут}$;

τ – длительность сбраживания, сут;

n – количество биореакторов.

Для снижения теплопотерь через стенки биореактора его форму нужно выбрать так, чтобы поверхность теплообмена была минимальной. Цилиндрическая емкость имеет наименьшую поверхность при соотношении высоты H , и радиуса R реактора, равном:

$$H = 4 \cdot R. \quad (9)$$

Исходя из условия (6), требуемые размеры биореактора:

– объем V , м^3 ,

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h; \quad (10)$$

– площадь поверхности S , м^2 ,

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h.$$

Подставив (6) в (7), получим формулу для расчета радиуса биореактора R , м:

$$R = \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot V}{\pi}}. \quad (11)$$

Рассчитаем размеры биореакторов в сельскохозяйственной биогазовой установке с суммарным суточным выходом субстрата $210,23 \text{ м}^3/\text{сут}$. Длительность сбраживания субстрата 10 суток.

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

$$V_{\text{тр}} = \frac{210,23 \cdot 10}{2} = 1051,15 \text{ м}^3.$$

Оптимальный радиус биореактора равен:

$$R = \sqrt[3]{\frac{1051,15}{2 \cdot 3,14}} = 5,51 \text{ м}.$$

Примем к установке биореактор радиусом $R = 5,4 \text{ м}$ и высотой $H = 18 \text{ м}$. Объем каждого биореактора:

$$V = 3,14 \cdot 5,4^2 \cdot 18 = 1648,12 \text{ м}^3$$

Площадь поверхности каждого биореактора:

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot 5,4^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 5,4 \cdot 18 = 793,54 \text{ м}^2.$$

Несколько большие размеры реактора по сравнению с требуемыми для размещения субстрата обеспечивают свободное пространство над поверхностью сбраживаемой массы для накопления биогаза. В случае совмещенных биореакторов-газгольдеров общий объем реактора должен превышать требуемое значение на величину двух или четырехчасового выхода биогаза.

2.4.3 Тепловой баланс биогазовой установки

Определим тепловую потребность сельскохозяйственной биогазовой установки, расположенной в районе с расчетной температурой наружного воздуха в холодный период года $t_n = \text{минус } 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Установка оборудована двумя биореакторами радиусом $5,4 \text{ м}$ и высотой 18 м . Общее количество жидкого субстрата $G_n = 210,23 \text{ м}^3$, влажность субстрата $W = 90 \%$. Длительность

сбраживания $t = 10$ суток. Режим сбраживания – мезофильный ($t_p = 35$ °С). Количество жидкого субстрата – $210,23$ м³. Выход биогаза составляет $5255,75$ м³/сут.

Статьи расхода теплоты на нужды биогазовой установки:

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

Теплопотери $Q_{\text{биогаз}}$, кВт, связанные с выходом биогаза из реактора, определяются как

$$Q_{\text{биогаз}} = \frac{Q_{\Gamma} \cdot V_{\text{биогаз}}}{24 \cdot 3600}, \quad (12)$$

где Q_{Γ} – объемное теплосодержание биогаза, кДж/м³:

$$Q_{\Gamma} = \rho \cdot c_{\text{биогаз}} \cdot t_p,$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

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

t_p – температура газа, °С.

Тепловой поток Q_{Γ}^* , кВт, эквивалентный потенциальному количеству теплоты, образуемому при сжигании выделившегося биогаза, составит:

$$Q_{\Gamma}^* = \frac{Q_{\text{н}} \cdot V_{\text{биогаз}}}{86400}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания биогаза, кВт/м³;

$V_{\text{биогаз}}$ – выход биогаза, м³/сут.

Суточная загрузка, кг, субстрата определяется как

$$m_c = \rho \cdot G_{\text{н}}, \quad (14)$$

где ρ – плотность субстрата, кг/м³, для технических расчетов можно принять $\rho = 900$ кг/м³.

Тогда:

$$Q_r^* = \frac{25000 \cdot 5255,75}{86400} = 1520,76 \text{ кВт.}$$

Суточная загрузка, кг, субстрата составит:

$$m_c = 900 \cdot 210,23 = 189207 \text{ кг.}$$

Тепловой поток, кВт, для подогрева свежего субстрата:

$$Q_c = \frac{m_c \cdot c_p (t_{бр} - t_c)}{3600 \cdot \Delta t}, \quad (15)$$

где m_c – загрузка субстрата, кг/сут;

c_p – теплоемкость субстрата, кДж/(кг °С);

$t_{бр}$ – температура брожения, °С;

t_c – минимальная температура свежего субстрата, °С;

Δt – время нагрева, ч.

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

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

– для холодного периода года

$$Q_c = \frac{189207 \cdot 4,2(35 - 5)}{3600 \cdot 24} = 275,93 \text{ кВт.}$$

– для теплого периода года

$$Q_c = \frac{189207 \cdot 4,2(35 - 15)}{3600 \cdot 24} = 183,95 \text{ кВт.}$$

Тепловой поток, кВт, через ограждающие конструкции рассчитывается по формуле

$$Q_k = F \cdot k (t_{бр} - t_n), \quad (16)$$

где F – поверхность теплообмена реактора, м²;

k – коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций, Вт/(м²·К);

t_n – расчетная температура наружного воздуха для холодного периода года.

Следовательно:

$$Q_k = 793,54 \cdot 0,2(35 - (-25)) = 9,522 \text{ кВт.}$$

Для определения теплотерь с биогазом вычислим его плотность. Состав биогаза в % по объему: $\rho_{\text{CH}_4} = 65 \%$, $\rho_{\text{CO}_2} = 34 \%$, $\rho_{\text{H}_2\text{S}} = 1\%$. Молекулярные массы компонентов: $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ г/моль}$, $\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ г/моль}$, $\mu_{\text{H}_2\text{S}} = 34 \text{ г/моль}$.

Считая, что биогаз подобен смеси идеальных газов, плотность i -го компонента биогаза ρ_i определяют по формуле:

$$\rho_i = \frac{P \cdot \mu_i \cdot k_i}{R \cdot T}, \quad (17)$$

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

μ_i – молекулярная масса i -го компонента;

k_i – объемная доля i -го компонента;

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

T – абсолютная температура газа, равная температуре режима сбраживания, К.

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

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{0,65(101,325 + 2) \cdot 16}{8,31(35 + 273,15)} = 0,419 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{0,34(101,325 + 2) \cdot 44}{8,31(35 + 273,15)} = 0,603 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{0,01(101,325 + 2) \cdot 34}{8,31(35 + 273,15)} = 0,014 \text{ кг/м}^3.$$

Суммарная плотность биогаза составит:

$$\rho = 0,387 + 0,444 + 0,014 = 1,03 \text{ кг/м}^3.$$

Теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении:

$$c_{\text{биогаз}} = \sum_{i=1}^n v_i \cdot c_i, \quad (18)$$

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		44

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

c_i – теплоемкость i -го компонента при постоянном давлении.

Следовательно, изобарная теплоемкость биогаза $c_{\text{биоГ}}$ составит:

$$c_{\text{биоГ}} = 0,6 \cdot 2,4 + 0,25 \cdot 0,8 + 0,01 \cdot 1,0 = 1,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Удельное теплосодержание биогаза $Q_{\text{Г}}$:

$$Q_{\text{Г}} = 1,8 \cdot 1,03 \cdot 35 = 64,89 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Теплопотери, связанные с выходом биогаза из реактора:

$$Q_{\text{Г}} = \frac{5255,75 \cdot 64,89}{24 \cdot 3600} = 3,844 \text{ кВт}.$$

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

$$\rho_{\text{в.п.}} = \frac{18(101,325 + 4,754)}{8,31(35 + 273,15)} = 0,746 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Объемное теплосодержание водяного пара:

$$Q_{\text{п}} = 0,746 \cdot 4,174 \cdot 35 = 108,6 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

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.

Теплопотери с водяными парами:

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{5255,75 \cdot 108,6}{24 \cdot 3600} = 6,606 \text{ кВт}.$$

Суммарные теплопотери двух биореакторов:

$$Q_{\text{Г}} = 9,522 \cdot 2 + 3,844 + 6,606 = 29,494 \text{ кВт}.$$

Суммарный тепловой поток на нужды биогазовой установки:

$$Q_{\text{Т}} = 29,494 + 275,930 = 305,424 \text{ кВт}.$$

Для каждого биореактора:

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		45

$$Q_T^1 = Q_T^2 = \frac{305,424}{2} = 152,712 \text{ кВт.}$$

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 $V = 1,1 \text{ м/с}$.

Расчет поверхностей нагрева проводится для одного биореактора. Тепловой поток Q_T , который необходимо возместить нагревательными приборами, составляет 152,712 кВт. Предварительные расчеты показывают, что целесообразно выбрать трубы диаметром 60 мм с толщиной стенки 3 мм.

Площадь живого сечения трубы f , м², по которой циркулирует теплоноситель:

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (19)$$

где $v = 1,0 \dots 1,2 \text{ м/с}$ – скорость движения теплоносителя.

Площадь живого сечения трубы диаметром 60 мм составит:

$$f = \frac{3,14 \cdot (0,06 - 2 \cdot 0,003)^2}{4} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Секундный объемный расход теплоносителя:

$$V = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 2,53 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Массовый расход теплоносителя, кг/с:

$$G = V \cdot \rho, \quad (20)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

Плотность воды при температуре 60 °С составляет 983,2 кг/м³.

Тогда:

$$G = 2,53 \cdot 10^{-3} \cdot 983,2 = 2,49 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Перепад температур на входе и выходе нагревательных приборов Δt , °С:

$$\Delta t = \frac{Q}{Gc}, \quad (21)$$

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

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

$$t_{в.к.} = t_{в.н.} - \Delta t. \quad (22)$$

Средняя температура теплоносителя, °С:

$$t_{ср} = \frac{(t_{в.н.} + t_{в.к.})}{2}. \quad (23)$$

Тогда средний температурный напор составит:

$$\Delta t = \frac{152,712}{2,49 \cdot 4,18} = 14,672 \text{ °С.}$$

Конечная температура воды на выходе из приборов:

$$t_{в.к.} = 60 - 14,672 = 45,328 \text{ °С.}$$

Средняя температура теплоносителя:

$$t_{ср} = \frac{(60 + 45,328)}{2} = 52,66 \text{ °С.}$$

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

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (24)$$

где $\nu = 0,485 \cdot 10^{-6}$ м²/с – кинематическая вязкость жидкости (воды);

d – характерный размер (диаметр трубы), м.

Число Re будет равно:

$$Re = \frac{1,1 \cdot 0,06}{0,485 \cdot 10^{-6}} = 13,6 \cdot 10^4,$$

следовательно, режим движения теплоносителя турбулентный.

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·°С), находится по формуле для цилиндрической стенки:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{в.дв}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \ln \left[\frac{d_{н.}}{d_{в.}} \right]} + \frac{1}{\lambda \cdot d_{н.}} + R_{н.} + R_{в.}, \quad (25)$$

где α_B и d_B – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и внешней поверхности трубы соответственно, Вт/(м²·°С);

d_B и d_H – соответственно внутренний: и наружный диаметр трубы, м;

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

R_H и R_B – соответственно факторы загрязнения со стороны субстрата и со стороны теплоносителя, (м²·°С)/Вт.

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·°С), вычисляется как

$$\alpha = \frac{l \cdot Nu}{\lambda_{ж}}, \quad (26)$$

где l – характерный линейный размер системы, м;

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

Nu – число Нуссельта:

$$Nu = \frac{0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,68}}{Pr_c^{0,25}}, \quad (27)$$

где $Pr_{ж}$ и Pr_c – значения критерия Прандтля, относящиеся к средней температуре жидкости и стенки соответственно.

При расчете коэффициента тепловосприятия со стороны сбраживаемого субстрата используются формулы для свободного конвективного теплообмена. Уравнение средней теплоотдачи для горизонтальных труб диаметром d при $10^3 < Gr_{ж} \cdot Pr_{ж} < 10^8$ имеет вид:

$$Nu = \frac{0,5(Gr_{ж} \cdot Pr_{ж}^2)^{0,25}}{Pr_c^{0,25}}, \quad (28)$$

где $Gr_{ж}$ – критерий Грасгофа, определяемый по формуле:

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d^3}{\chi^2}, \quad (29)$$

где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

$\beta = 3,54 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ – коэффициент объемного расширения среды;

d – наружный диаметр трубы, $d = 0,066$ м;

Δt – характерная разность температур, °С;

$\chi = 0,732 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость субстрата.

Значения критерия Прандтля, относящиеся к температуре жидкости: $Pr_{\text{ж}} = 2,54$; стенки: $Pr_{\text{с}} = 2,97$. Подставив значения в формулы (23) и (24), получим: $Nu = 372,7$; $\alpha_{\text{в}} = 4362 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

Рассчитав коэффициент тепловосприятия со стороны субстрата, по формулам (22 – 26) получим: $Gr = 2,4 \cdot 10^7$; $Pr = 4,87$; $Nu = 53,37$; $\lambda = 0,648 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$. Поставив полученные значения, вычислим $\alpha_{\text{н}} = 519 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Значения факторов загрязнения примем по справочным данным: $R_{\text{в}} = 0,002 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$; $R_{\text{н}} = 0,02 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$.

Коэффициент теплопередачи составит: $k = 30,05 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Средний температурный напор, $^\circ\text{С}$:

$$\Delta t = \frac{(\Delta t_{\text{с}} - \Delta t_{\text{м}})}{\ln \left[\frac{\Delta t_{\text{с}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right]}, \quad (30)$$

где $\Delta t_{\text{с}} = \Delta t_{\text{в.н}} - \Delta t_{\text{бпр}}$, $^\circ\text{С}$;

$\Delta t_{\text{м}} = \Delta t_{\text{в.к}} - \Delta t_{\text{бпр}}$;

$\Delta t_{\text{бпр}}$ – температура в бродильной камере, $^\circ\text{С}$.

Поверхность теплообмена F , м^2 , определяется как

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}, \quad (31)$$

где Q – тепловой поток, который необходимо возместить нагревательными приборами, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$;

Δt – средний перепад температур, $^\circ\text{С}$.

Общая требуемая длина труб для обогрева, м:

$$l = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{н}}}. \quad (32)$$

При расчете для горизонтальных труб вычисляется внутренний периметр Π , м, биореактора:

$$\Pi = \pi \cdot D_{\text{в}}.$$

Определим средний температурный напор:

$$\Delta t_6 = 60 - 35 = 25 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_m = 45,33 - 35 = 10,33 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t = \frac{(25 - 10,33)}{\ln \left[\frac{25}{10,33} \right]} = 16,60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Требуемая поверхность нагрева:

$$F = \frac{152,712 \cdot 10^3}{30,05 \cdot 16,60} = 306,140 \text{ м}^2.$$

Общая требуемая длина труб для обогрева:

$$l = \frac{306,140}{3,14 \cdot 0,066} = 1477,22 \text{ м}.$$

Расчет выполнен для горизонтальных труб. Внутренний периметр био-реактора:

$$П = 3,14^2 \cdot 5,4 = 53,24 \text{ м}.$$

Количество витков обогревательных труб:

$$n = \frac{1477,22}{53,24} = 27,7 \approx 28.$$

Принимаем теплообменник с двадцатью восемью витками.

Затраты теплоты на собственные нужды процесса:

– в холодный период года (зимнее время)

$$Q_{с.н}^{\text{зим}} = \frac{4,02 \cdot 210,23 \cdot (35 - 5)}{0,7} = 36219,63 \text{ кДж}.$$

– в теплый период года (летнее время)

$$Q_{с.н}^{\text{лет}} = \frac{210,23 \cdot 4,02(35 - 15)}{0,7} = 24146,42 \text{ кДж}.$$

Общее количество биогаза на собственные нужды:

$$V_{\text{биогаз, т}}^{\text{зим}} = \frac{36219,63}{25} = 1448,79 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$V_{\text{биогаз, т}}^{\text{лет}} = \frac{24146,42}{25} = 965,86 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		50

Количество товарного биогаза $V_{\text{биогаз}}^T$, м³/сут, составит:

$$V_{\text{биогаз}}^T = V_{\text{биогаз}} (1 - \eta_{\text{биогаз}}). \quad (33)$$

Следовательно, выход биогаза:

$$V_{\text{биогаз, т}}^{\text{зим}} = 5255,75 - 1448,79 = 3806,96 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$V_{\text{биогаз, т}}^{\text{лет}} = 5255,75 - 965,86 = 4289,89 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Коэффициент расхода биогаза на собственные нужды биогазовых установок:

$$\eta_{\text{бпот}} = \frac{\Sigma Q}{Q_r \cdot \eta}, \quad (34)$$

где ΣQ – суммарный тепловой поток биогазовой установки на собственные нужды, кВт;

Q_r – удельное теплосодержание биогаза, кДж/м³;

η – КПД нагревательного устройства.

Тогда:

$$\eta_{\text{биогаз}}^{\text{зим}} = \frac{1448,79}{5255,75} = 0,28;$$

$$\eta_{\text{биогаз}}^{\text{лет}} = \frac{965,86}{5255,75} = 0,18.$$

На основании расчета для мезофильного режима расход биогаза на собственные нужды в зимний период составляет 28 %, а в летний период 18 %. Таким образом, выход товарного биогаза в зимний период составляет 72 %, а в летний период 82 %.

2.4.4 Материальный баланс биогазовой установки

Известно, что 16 % отходов разлагаются, а остальные 84 % остаются в остатке [6].

Рассчитаем количество разложившихся отходов:

$$M_{\text{раз}} = \frac{m \cdot C}{100\%} = \frac{189204,75 \cdot 16}{100} = 30272,76 \text{ кг}, \quad (35)$$

где m – масса субстрата, кг;

C – количество разложившихся пищевых отходов.

Рассчитаем количество отходов, оставшихся в остатке:

$$M_{ост} = m - M_{раз} = 189204,75 - 30272,76 = 158931,99 \text{ кг}, \quad (36)$$

где m – масса пищевых отходов, кг;

$M_{ост}$ – масса разложившихся отходов, кг.

Рассчитаем содержание по объему каждого компонента:

$$V_{CH_4} = \frac{V_{вых} \cdot C_{CH_4}}{100} = \frac{5255,75 \cdot 65}{100} = 3416,24 \text{ м}^3, \quad (37)$$

$$V_{CO_2} = \frac{V_{вых} \cdot C_{CO_2}}{100} = \frac{5255,75 \cdot 34}{100} = 1786,96 \text{ м}^3,$$

$$V_{H_2S} = \frac{V_{вых} \cdot C_{H_2S}}{100} = \frac{5255,75 \cdot 1}{100} = 52,56 \text{ м}^3,$$

где C_{CH_4} – объем метана в биогазе;

C_{CO_2} – объем углекислого газа в биогазе;

C_{H_2S} – объем сероводорода в биогазе.

Масса образовавшегося биоудобрения – 158931,99 кг.

Определяем массовое содержание сероводорода, метана и углекислого газа в биогазе:

$$M_{CH_4} = \frac{M_{раз} \cdot V_{CH_4}}{V_{вых}} = \frac{30272,76 \cdot 3416,24}{5255,75} = 19677,31 \text{ кг}, \quad (38)$$

$$M_{CO_2} = \frac{M_{раз} \cdot V_{CO_2}}{V_{вых}} = \frac{30272,76 \cdot 1786,96}{5255,75} = 10292,71 \text{ кг},$$

$$M_{H_2S} = \frac{M_{раз} \cdot V_{H_2S}}{V_{вых}} = \frac{30272,76 \cdot 52,56}{5255,75} = 302,74 \text{ кг}.$$

Сводим материальный баланс в таблицу 8.

Таблица 8 – Материальный баланс

Компоненты	Приход, (кг)	Компоненты	Расход, (кг)
Субстрат	189204,75	CH ₄	19677,31
		CO ₂	10292,71
		H ₂ S	302,74
		Сброженный субстрат	158931,99
Итого:	189204,75	Итого:	189204,75

По данным таблицы можно сделать вывод, что масса субстрата, поступающего на переработку, равна сумме масс получаемого биогаза и дигестата.

2.4.5 Расчет биогазового когенератора

Утилизация биогаза с получением тепла предусматривает использование теплогенераторов, а электроэнергии – электрогенераторов. Для совместного получения тепла и электроэнергии можно использовать когенераторы [1].

Расход биогаза для получения тепла, электроэнергии $q_{\text{биог}}$, м³/ч, определяется по формуле:

$$q_{\text{биог}} = \frac{3600 \cdot P}{\eta \cdot Q_{\text{H}}}, \quad (39)$$

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

η – КПД генератора (тепловой, электрический);

Q_{H} – низшая теплота сгорания биогаза, кДж/м³.

Определим расход очищенного биогаза с низшей теплотой сгорания 30000 кДж/м³ для получения электрической и тепловой энергии когенератором ГПЭС-200 ЯМЗ-7514, имеющим расход топлива при номинальной мощности 60 м³/ч, электрическую мощность – 200 кВт, электрический КПД – 44,0 %, тепловую мощность – 250 кВт, тепловой КПД – 45,0 %.

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

$$q_{\text{биог.эл}} = \frac{3600 \cdot 200}{0,440 \cdot 30000} = 54,54 \text{ м}^3/\text{ч} = 1308,96 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

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

$$q_{\text{биог.теп}} = \frac{3600 \cdot 250}{0,450 \cdot 30000} = 66,60 \text{ м}^3/\text{ч} = 1598,40 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Вывод по технологической части:

В ходе выполнения технологической части:

1. Определено суммарное количество субстрата, поступающего в реактор на переработку – 189204,75 кг.

2. Рассчитан предполагаемый выход биогаза – 5255,75 м³/сут.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		53

3. Найдены основные размеры метантенка: диаметр реактора – 10,8 м, высота – 18 м. Объем метантенка составил 1648,12 м³, площадь поверхности – 793,54 м².

4. Определена тепловая потребность сельскохозяйственной биогазовой установки. Рассчитаны статьи расхода теплоты, количество товарного биогаза и коэффициент его расхода на собственные нужды.

5. Составлен материальный баланс биогазовой установки. Масса биодобровений, согласно сводной таблице 4, составила 158931,99 кг.

6. Подобран биогазовый когенератор ГПЭС-200 ЯМЗ-7514. Расход биогаза для получения электроэнергии составил 1308,96 м³/сут, а для получения тепловой энергии – 1589,40 м³/сут.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		54

3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

3.1 Требования, предъявляемые к биогазовым установкам

3.1.1 Основные требования безопасности при эксплуатации установки

Для соблюдения безопасности технологических процессов биогазовая установка должна соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.007.0 и ГОСТ Р 53790-2010 [23, 24].

Основные требования:

1. Электротехническое оборудование и обслуживающее помещение метантенков должны быть оборудованы резервным электропитанием, чтобы обеспечить постоянную работу вентиляторов с необходимой кратностью воздухообмена.

2. Не допускается нахождение работников и проведение любых работ в помещениях метантенков при неработающей вентиляции.

3. В обслуживаемых помещениях метантенков электрическое освещение, электродвигатели, пусковые и токопитающие устройства и аппаратура должны быть взрывозащищенного исполнения в соответствии с классом взрывоопасной зоны.

В помещениях метантенков 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.

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	55	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

4. Газовые сети каждого метантенка должны быть оборудованы устройством для отключения от магистрального трубопровода.

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

6. Порядок производства работ на площадке метантенков определяется инструкцией, разрабатываемой в соответствии с требованиями организации – изготовителя установки (в случае биогазовых установок для сточных вод инструкция должна быть утверждена руководителем организации).

7. Работники, обслуживающие метантенки 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 метантенков с помощью газоанализаторов;

– не допускать утечки газов.

8. В помещениях, где обнаружена утечка газа, должны быть приняты срочные меры по устранению загазованности.

9. При проведении ремонтных работ в загазованной среде помещений применяют слесарные инструменты, изготовленные из цветного металла, исключающие 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.

10. Сварочные или другие работы, связанные с применением открытого огня, проводятся на метантенках и в обслуживающих их помещениях с

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		56

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.

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

3.1.2 Требования охраны окружающей среды и здоровья персонала

Согласно стандарту [24], работу биогазовых установок необходимо организовывать так, чтобы выполнялись требования охраны окружающей среды и здоровья персонала:

– Сырье для биогазовых установок – отходы животноводства и растениеводства, осадки сточных и промышленных вод – не должно загрязнять водные ресурсы.

– 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 неприятный запах.

– Необходимо соблюдать предохранительные меры для предотвращения заражения обслуживающего персонала биогазовой установки патогенной микрофлорой, содержащейся в осадках сточных вод и отходах сельскохозяйственного производства. Не рекомендуется принимать пищу рядом с биогазовыми установками.

– Требования по электромагнитной совместимости электрооборудования, входящего в состав биогазовой установки, должны быть установлены в стандартах и ТУ на биогазовые установки конкретных видов.

3.2 Должностные инструкции оператора установки

Должностные инструкции оператора биогазовой установки включают [25]:

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		57

- Проверку герметичности оборудования, коммуникаций, арматуры;
- Контроль исправности контрольно-измерительных приборов, механизмов и приспособлений;
- Контроль и регулирование технологических процессов производства биогаза;
- Контроль качества сырья, продукции и технологических процессов;
- Контроль и регистрация показаний контрольно-измерительных приборов;
- Ведение технологических процессов производства биогаза;
- Подготовку сырья;
- Обеспечение технологических процессов метаногенеза;
- Обеспечение технологических процессов выделения и химической очистки метана;
- Подготовку и поддержание квалификации в соответствии с установленными требованиями. Изучение передового отечественного и зарубежного опыта получения биогаза;
- Ведение установленной отчетности.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		58

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель дипломной работы заключалась в совершенствовании и закреплении профессиональных компетенций, подборе и анализе научной и научно-технической литературы, в том числе расчете установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества.

Был изучен химизм образования биогаза; рассмотрены основные способы его очистки от нежелательных компонентов. Разработана технологическая схема производства биогаза: рассчитано количество субстрата, выход биогаза и основные размеры метантенка. Составлен материальный и тепловой балансы реактора. Изучены требования безопасности и охраны окружающей среды на биогазовой установке. Рассмотрены квалификационные требования, предъявляемые к работнику биогазовой станции.

Таким образом, поставленные задачи были решены в полном объеме.

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	59	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Комина, Г. П. Получение и использование биогаза в решении задач энергосбережения и экологической безопасности : учебное пособие / Г. П. Комина, А. В. Сауц. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 96 с.

2 Лapidус, А. Л. Газохимия : учебник для вузов / А. Л. Лapidус, И. А. Голубева, Ф. Г. Жагфаров – М. : Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013. – 405 с.

3 Ишков, А. Г. Роль биогаза в современной энергетике / А. Г. Ишков, Н. Б. Пыстина // Территория нефтегаз. – 2014. – № 5(11). – С. 130-137.

4 Корлюга, А. А. Потенциальные возможности применения биогаза для зданий и сооружений / А. А. Корлюга, Т. И. Лохвинская // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений : электронный сборник статей по материалам второй открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Макеевка, 2021. – С. 382-385.

5 Курманов, А. К. Совершенствование технологии производства биогаза / А. К. Курманов // Вестник ВНИИМЖ. – 2014. – № 3(4). – С. 170-177.

6 Баадер, В. Биогаз : теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер (Пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного). – М. : Колос, 1982. – 75 с.

7 Вандышева, М. С. Способ получения биогаза и удобрения / М. С. Вандышева, А. В. Мартьянычев, Н. В. Оболенский // Карельский научный журнал. – 2015. – № 1(10). – С. 157-159

					<i>ВКР. 181143.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Решетов Г.А.</i>			<i>Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лескова С.А.</i>				У	60	63
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ ИФФ 818-об гр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

8 Эдер, Б. Биогазовые установки : практическое пособие / Б. Эдер, Х. Шульц. – Zorg Biogas, 1996. – 268 с.

9 Сафина, С. Д. Сравнительный анализ конструкций биоэнергетических установок / С. Д. Сафина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 4-4. – С. 50-52.

10 Михайлюк, А. А. Технология производства и хранения биотоплива / А. А. Михайлюк, Р. А. Захаревич, науч. рук. Д. А. Секацкий // материалы 74-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет ; ред. Т. Е. Жуковская. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 468-470.

11 Нигматуллаев, А. А. Подготовка биогаза к использованию / А. А. Нигматуллаев, науч. рук. Л. И. Тиллоев, // Вопросы науки и образования – 2017. – № 2(3). – С. 52-53.

12 Друзьянова, В. П. Цеолит и перспективы его использования при очистке биогаза / В. П. Друзьянова, науч. рук. Н. В. Петров // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 18(6). – С. 50-62.

13 Лосюк, Ю. А. Очистка биогаза до товарного продукта / Ю. А. Лосюк, Г. В. Орендаренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 4(6). – С. 70-74.

14 Биоэнергетика : мировой опыт и прогноз развития. Научный аналитический обзор / под ред. В. В. Ананьева, И. С. Горячева, В. И. Сидорова. – М. : Росинформагротех, 2007. – 130 с.

15 Ковалева, Ю. К. О способах очистки биогаза от сероводорода / Ю. К. Ковалева, Н. М. Михайлов, К. В. Трубицин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 382-385.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		61

16 Кружкова, Ю. Н. Проекты энергосберегающих технологий / Ю. Н. Кружкова, А. И. Волхонская // Первая ступень в науке. Сборник трудов ВГМХА по результатам работы Ежегодной научно-практической студенческой конференции. Инженерный факультет. – Вологда-Молочное : 2012. – С. 12-25.

17 Щукина, Т. В. Биогаз – перспективы и возможности производства / Т. В. Щукина // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2012. – № 1(2) – С. 113-118.

18 Суслов, Д. Ю. Интенсификация процесса получения биогаза барботажным перемешиванием субстрата : монография / Д. Ю. Суслов. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2016. – 95 с.

19 Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов : монография / Я. И. Вайсман, В. Н. Коротаев, И. С. Глушанкова [и др.] ; под редакцией Я. И. Вайсмана. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. – 259 с.

20 Земсков, В. И. Проектирование технических систем производства биогаза в животноводстве : учебное пособие / В. И. Земсков, И. Ю. Александров. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 312 с.

21 ОСТ 51.40-93. Газы горючие природные, поставляемые и транспортируемые по магистральным газопроводам ; введ. 1993-10-01. – ВНИИ природных газов и газовых технологий ; М. : Стандартинформ, 1993. – 5 с.

22 ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового значения. : технические условия ; введ. 1988-01-01. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии ; М. : Стандартинформ, 2011. – 17 с.

23 ГОСТ Р 53790-2010. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов : общие технические требования ; введ. 2010-31-05. – Федеральное

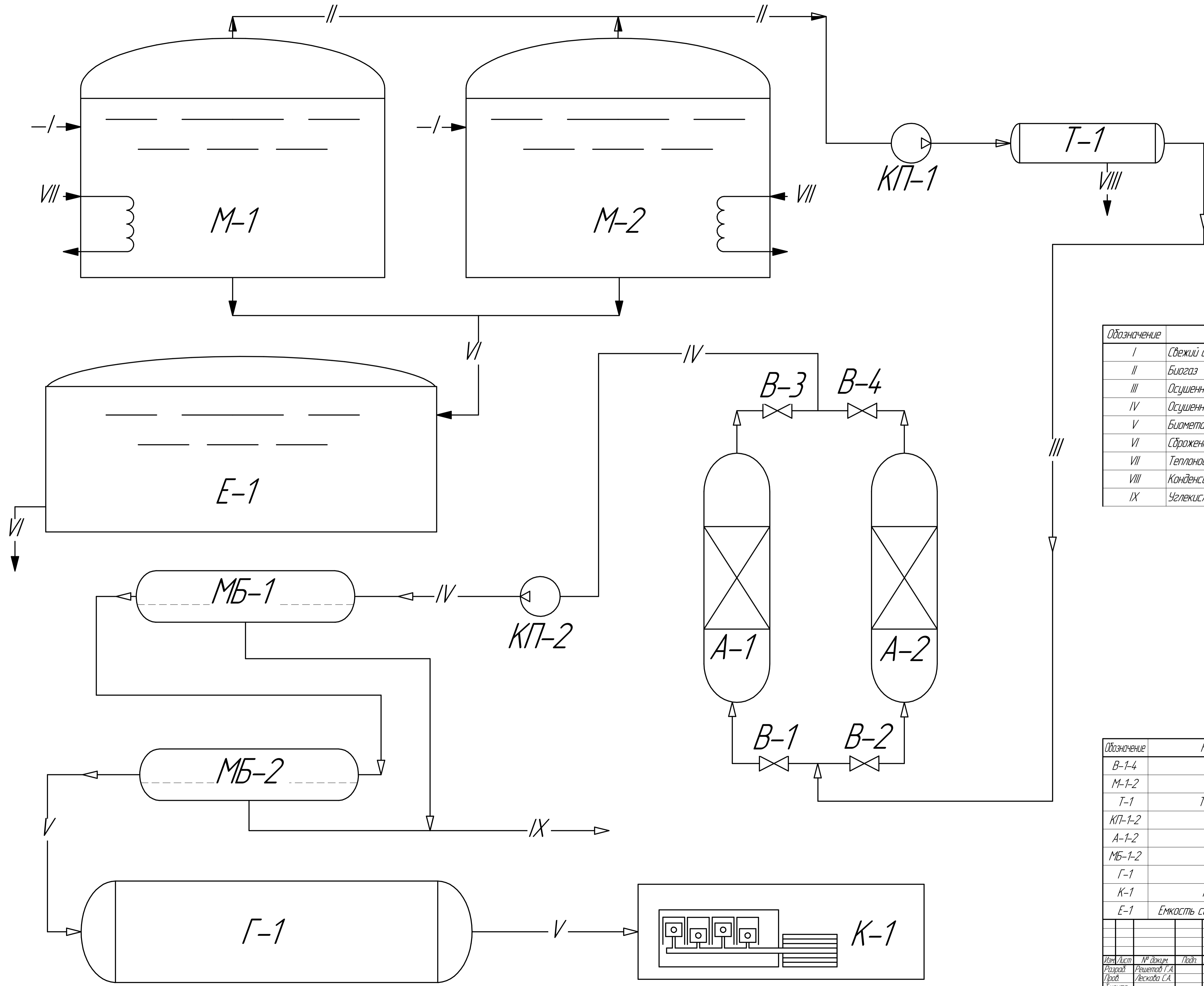
					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

агентство по техническому регулированию и метрологии ; М. : Стандартинформ, 2011. – 15 с.

24 ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические : общие требования безопасности ; введ. 1978-01-01. – Межгосударственный стандарт ; М. : Стандартинформ, 2008. – 12 с.

25 ЕТКС. Выпуск № 67. Разделы : «Газовое хозяйство городов, поселков и населенных пунктов» ; «Водопроводно-канализационное хозяйство» ; «Зеленое хозяйство» ; «Фотоработы» ; утв. Постановлением Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и ВЦСПС от 1984-18-09 N 272/17-70.

					<i>ВКР.181143.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		63



Обозначение	Наименование	Примечание
I	Свежий субстрат	
II	Биогаз	
III	Осушенный биогаз	
IV	Осушенный и очищенный биогаз	
V	Биометан	
VI	Сброженный субстрат	
VII	Теплоноситель	
VIII	Конденсат	
IX	Углекислый газ	

Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
B-1-4	Вентиль	4	
M-1-2	Метантенк	2	
T-1	Теплообменник	1	
КП-1-2	Компрессор	2	
A-1-2	Адсорбер	2	
МБ-1-2	Мембрана	2	
Г-1	Газгольдер	1	
К-1	Когенератор	1	
E-1	Емкость сброженного субстрата	1	

ВКР.18114.3.180301.ТС

Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Расчет установки получения биогаза из органических отходов и подготовки его до товарного качества	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Решетов Т.А.				у		1:1
Проб.	Лескова С.А.			Технологическая схема биогазной установки	Лист	Листов	1
Т.контр.							
Исполн.	Радина Т.А.			Копирайтер	АМГУ ИФФ		
Экз.	Гужель Ю.А.				гр. 818-ад		
					Формат А1		

Масштаб: 1:1
 Лист: 1 из 1
 Дата: 2018.03.01
 Автор: Решетов Т.А.
 Проверил: Лескова С.А.
 Т.контр.:
 Исполн.: Радина Т.А.
 Экз.: Гужель Ю.А.