

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

Институт химии и инженерной экологии

(наименование института полностью)

Кафедра «Рациональное природопользование и ресурсосбережение»

(наименование кафедры)

18.04.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки)

Рациональное использование природных и сырьевых ресурсов в химической  
технологии и нефтехимии

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Получение альтернативной энергии при анаэробной деструкции  
органических отходов

Студент

М.В. Гончаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

В.С. Гончаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

к.х.н., доцент, Ю.Н. Орлов

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

к.п.н., доцент, М.В. Кравцова

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

Тольятти 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	9
Глава 1 Анализ технологий получения альтернативной энергии при анаэробной деструкции органических отходов .....	10
1.1 Актуальные проблемы в области методов и технологий деструкции органической фракции ТКО и рациональное использование ресурсов .....	10
1.2 Основы биогазовой технологии .....	14
1.3 Анаэробное сбраживание. Этапы процесса возникновения биогаза	16
1.4 Одно- и многоступенчатые процессы получения биогаза в биореакторных установках .....	20
1.5 Количественный и качественный состав биогаза.....	22
1.6 Сырье для генерации биогаза .....	22
1.7 Биогаз в сравнении с другими газами.....	23
1.8 Благоприятная среда для образования бактерий .....	24
1.9 Анаэробный пиролиз отходов .....	31
1.9.1 Быстрый пиролиз органических отходов .....	34
1.9.2 Продукты быстрого пиролиза органических отходов .....	35
1.10 Использование продуктов пиролиза и анаэробного сбраживания	37
1.11 Литературно-патентный поиск по конструктивным особенностям биогазового оборудования для анаэробного сбраживания органических отходов .....	47
1.12 Биогазовая установка горизонтального типа .....	48
1.13 Биогазовая установка вертикального типа.....	52
Глава 2 Предложение конструкторско-технологических решений по интенсификации процессов анаэробной деструкции органических отходов.	58
2.1 Интеграция процессов анаэробной деструкции органических отходов для получения альтернативной энергии .....	58

2.2 Проектирование комплексного оборудования для анаэробной деструкции органических отходов.....	63
2.2.1 Требуемые параметры к основным узлам разрабатываемого оборудования.....	63
2.2.2 Назначение и устройство основных узлов секции процесса анаэробного сбраживания.....	64
2.2.3 Принцип работы основных узлов секции процесса анаэробного сбраживания.....	70
2.2.4 Серийное оборудование и компоненты комплексного оборудования для анаэробной деструкции органических отходов.....	71
2.2.5 Подбор консорциума микроорганизмов для анаэробного сбраживания органических коммунально-бытовых отходов.....	79
Глава 3 Проведение технико-экономической оценки рыночного потенциала при внедрении комплексной технологии анаэробной деструкции органических отходов.....	84
3.1 Расчет капитальных вложений (инвестиций).....	86
3.2 Расчет годовой производственной мощности.....	87
3.3 Организация труда рабочих.....	88
3.4 Организация управления производством.....	91
3.5 Расчет себестоимости производимой продукции.....	92
3.6 Расчет экономической эффективности проекта.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	99

## ВВЕДЕНИЕ

Экологические преимущества от использования биомассы в сочетании с ценами и запасами нефти, а также политической нестабильностью, которая характерна для многих нефтедобывающих стран, сделали биомассу неотъемлемой частью первичных источников энергии.

По данным Организация Объединённых Наций по промышленному развитию (ЮНИДО) – Россия, только по объемам растительного возобновимого энергосырья (включая сельскохозяйственные и органическую фракцию ТКО), занимает одно из первых мест в мире по энергоёмкости, но по уровню их использования – одно из последних.

Био и пиролизный газ получаемые путем анаэробного сбраживания, и термохимической деструкции органического сырья – это два основных вектора энергии, которые генерируют тепло- и электроэнергию за счет их использования в когенерационных системах.

Ведущие биогазовые державы в связи с быстро истощающимися запасами невозобновляемых энергоносителей во главу угла, при переработке органических отходов, ставят получение наибольшего объема газа, но стоит отметить, что ежегодное количество органических отходов, захороненных в России, составляет около 20 миллионов тонн и это составляет порядка 40% от количества органических удобрений, используемых в сельском хозяйстве.

**Актуальность** проблемы по утилизации и рециклингу ТКО с получением альтернативных энергоносителей, вызвана целым рядом причин, к которым относятся:

- постоянный рост тарифов на энергоносители и вывоз отходов;
- антропогенное воздействие на окружающую среду и здоровье населения, связанное с выбросами в воздушную атмосферу продуктов разложения отходов, загрязнением водных бассейнов;

- потери, связанные с упущенными возможностями получения энергоресурсов, содержащихся в отходах, на фоне стремительно сокращающихся не возобновляемых природных ископаемых;
- постоянно увеличивающееся отчуждение земель под захоронение отходов и дальнейшая их непригодность для сельскохозяйственных нужд;
- образование санкционированных и несанкционированных свалок, нарушающих экологические и санитарные нормы;
- труднодоступности, в некоторых случаях, получения магистрального природного газа, централизованного электроснабжения и других видов энергии. Все эти проблемы обуславливают необходимость развития нетрадиционных подходов в методах переработки продуктов жизнедеятельности человека и получении доступной энергии.

Производство биометана в процессах анаэробного сбраживания является самодостаточной технологией, однако для более полного использования различных фракций органических отходов, в первую очередь постоянно растущих объемов упаковки (бумаги, картона, пластика), преодоления задержек и нестабильности переработки, в целях повышения производительности процесса и конечного выхода метана, а также получения высокоэнергетического вторичного продукты требуется применение комбинированных технологий.

**Цель исследования:** эффективная утилизация отходов жизнедеятельности человека с получением альтернативной энергии и вторичных продуктов с высокой энергетической плотностью.

**Задачи, решаемые в рамках поставленной цели:**

1. Провести анализ существующих методов и технологий по утилизации органических отходов с получением вторичного продукта.
2. Провести анализ условий, факторов и этапов получения альтернативной энергии при анаэробной деструкции органических отходов.

3. Провести патентный поиск в области оборудования и компонентов для анаэробной деструкции органических отходов.

4. Спроектировать технологическую схему и узлы комплексного оборудования для утилизации органических отходов анаэробным методом.

5. Провести расчет технико-экономической оценки рыночного потенциала при внедрении комплексной технологии анаэробной деструкции органических отходов.

**Объектами исследования работы выступают:**

Методы, оборудование и технологические процессы, применяемые в настоящее время для анаэробной деструкции органических отходов, в индивидуальном частном или сельском хозяйстве, а также в небольших муниципальных образованиях.

**Предметом исследования:**

Концептуальные, технологические и конструкторские решения по повышению эффективности анаэробных методов и технологий утилизации органических отходов, с интенсификацией выработки высокоэнергетических вторичных продуктов.

**Теоретической и методологической основой исследования являются** научные исследования отечественных и зарубежных ученых в области биотехнологии, химической технологии и ресурсосбережения.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

1. Предложена оригинальная концептуальная схема интеграции технологических процессов анаэробной деструкции органических отходов методами сбраживания и термохимической переработки.

2. Спроектирована оригинальная конструктивная схема секции анаэробного сбраживания жидкой фракции органических отходов, работающая по замкнутому циклу, с использованием оборотной канализационной воды.

3. Спроектирована оригинальная конструкция реактора секции анаэробного сбраживания жидкой фракции органических отходов.

### **Практическая значимость исследования:**

В ходе проведения исследования предложен инновационный способ интеграции технологий анаэробной деструкции органических отходов на основе их сбраживания и термохимического разложения. Отличительной особенностью является принцип взаимного использования энергетических потоков представленных технологий, что содействует максимальной производительности при биодegradации трудно разлагаемых лигноцеллюлозных биомасс.

Предложенные конструкторские решения, с проработкой отдельных узлов и агрегатов, позволяют автоматизировать процесс анаэробной переработки отходов и использовать оборотную воду (канализационные стоки) для движения сбраживаемой биомассы по технологической замкнутой цепи.

В ходе работы над проектом комплексной технологии анаэробной деструкции органических отходов, был проведен расчет ее технико-экономического потенциала, свидетельствующий о целесообразности и рентабельности разработки.

### **Защищаемые положения:**

1. Технологическая схема интегрирования процессов анаэробной деструкции органических отходов.
2. Конструктивная проработка системы анаэробного сбраживания органических отходов, работающая в автоматическом режиме, по замкнутому циклу с использованием оборотной воды.
3. Конструкция 3-х секционного реактора анаэробного сбраживания.

### **Личный вклад:**

Автор лично разрабатывал конструкцию реактора биогазовой установки, с проработкой отдельных ее узлов и элементов, проводил подбор серийного оборудования и комплектующих. Разрабатывал концептуальную схему по интеграции методов анаэробной деструкции органических отходов и конструктивную проработку секции анаэробного брожения. Проводил

расчет технико-экономических показателей рентабельности проекта.  
Принимал участие в научном оформлении материалов.

#### **Апробация результатов диссертации:**

Результаты работы докладывались на конференциях:

1. Всероссийская научно-практическая конференция «Студенческие Дни науки в ТГУ».
2. Региональная научно-практическая конференция «Инновации и «зеленые» технологии».

#### **Публикации**

1. Гончаров, В.С. Переработка и очистка промышленно-бытовых стоков комбинированным методом [Текст] / В.С. Гончаров, Т.В. Зимица, М.В. Гончаров // ELPIT – 2017 : сб. трудов международного экологического конгресса. – Тольятти, 2017. – Т. 6. – С. 66 – 70
2. Гончаров, М.В. Интеграция процессов анаэробной деструкции органических отходов для получения альтернативной энергии [Текст] / М.В. Гончаров, В.С. Гончаров // «МОЛОДЕЖЬ. НАУКА. ОБЩЕСТВО» : сб. трудов Всероссийской научно-практической междисциплинарной конференции. – Тольятти, 2018. – С. 607 – 609

#### **Структура и объем диссертации:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников, включающего 72 наименования, в том числе 30 иностранных источников. Объем работы составляет 106 страниц машинописного текста, содержит 20 рисунков, 17 таблиц, 43 формулы.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВП	–	валовой внутренний продукт
ГГУ	–	газогенерирующая установка
ДВС	–	двигатель внутреннего сгорания
КРС	–	крупный рогатый скот
КИПиА	–	контрольно-измерительные приборы и автоматика
КПД	–	коэффициент полезного действия
МСЗ	–	мусоросжигательный завод
МПА	–	мясопептонный агар
НБО	–	не компостируемые бытовые отходы
ПГ	–	парниковые газы
СВ	–	сухое вещество
СО	–	сухой остаток
СПА	–	питательный агар для культивирования микроорганизмов
ТКО	–	твердые коммунальные отходы
ТОТЭ	–	твердые оксидные топливные элементы
ЮНИДО	–	Организация Объединённых Наций по промышленному развитию
CSTR	–	реактор с непрерывным перемешиванием
CPV	–	солнечный электрогенерирующий концентратор
CMS	–	углеродное молекулярное сито
LPG	–	сжиженный углеводородный газ
PSA	–	метод очистки газа от углекислоты
VFA	–	летучие жирные кислоты

# **Глава 1 Анализ технологий получения альтернативной энергии при анаэробной деструкции органических отходов**

## **1.1 Актуальные проблемы в области методов и технологий деструкции органической фракции ТКО и рациональное использование ресурсов**

По состоянию на сегодняшний день населения планеты, в подавляющем большинстве, сталкивается с двумя основополагающими проблемами в области энергоснабжения: во-первых, потребность в новых альтернативных источниках энергии, во-вторых, надлежащая утилизации муниципальных и индивидуальных твердых коммунальных отходов (ТКО).

«К твердым коммунальным отходам (ТКО) относятся отходы, включающие в себя домашний мусор, производимый людьми, а также предметы, которые утратили свои потребительские свойства, после использования их физическими лицами для удовлетворения своих личных потребностей. К ТКО относятся также отходы, полученные в результате деятельности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, если по своему морфологическому составу они схожи с отходами жилых помещений физических лиц» [41].

Согласно данным приведенным в [7, 41] в развивающихся странах около 18% ТКО отправляется на открытые свалки, 58% на полигоны (закапывание ТКО) и 24% на контролируемые полигоны.

В целом ситуация с управлением отходами для подавляющего большинства регионов РФ крайне неудовлетворительная, вследствие отсутствия необходимого количества современных полигонов и перерабатывающих предприятий, отсутствия финансовых ресурсов для реализации целевых региональных программ, повышения антропогенного воздействия на окружающую среду и постоянно растущего количества накопленных отходов. «Средние показатели ежегодного увеличения объема отходов, производимых в РФ 4 – 6%. По состоянию на 2016 г. площадь свалок ТКО в России составляла около 4 млн. га, при этом ежегодный

прирост отчуждаемых земель под захоронение ТКО в настоящее время, не менее 0,4 млн. га в год (без учета «несанкционированных») и имеет тенденцию к увеличению, что приводит к выбросу опасных компонентов (ртуть, тяжелые металлы, токсины и т.д.), а, следовательно, к возникновению необратимых процессов деградации окружающей среды и реальной угрозе здоровью населения» [28,35,41].

Ежегодно в нашей стране генерируется около 7 млрд. тонн отходов, из которых только 2 млрд. тонн (28,6%) используются. Вследствие чего на территории Российской Федерации накоплено свыше 80 миллиардов тонн ТКО. Кроме того, действующие мусороперерабатывающие предприятия в РФ осваивают не более 8% ТКО, следовательно, более 90% бытовых отходов поступает на свалки. Процентное соотношение объема переработки остается неизменным на протяжении уже десятилетий [41].

Основными антропогенными последствиями накопления мусора являются его воздействие на атмосферный воздух, почву и водные ресурсы. Воздействие на атмосферу земли обусловлено гниением отходов, что ведет к образованию вредных газов. По данным Федеральной службы государственной статистики, в 2017 году в областях локализации твердых отходов, было выброшено в атмосферу порядка 87 млн. тонн CO<sub>2</sub>. Влияние на воду и почву происходит за счет образования и накопительного эффекта в твердых отходах фильтрата, который обладает токсичными свойствами [35].

Ввиду отсутствия в России централизованного систематизированного контроля морфологического состава ТКО, такой анализ можно проводить только согласно данным микрообследований, «проводимых операторами и различными ассоциациями разных регионов в разное время. И их выводы очень разные. По данным Ассоциации рециклинга в России доля бумаги и картона – 41% стеклянной фракции – 3%, что противоречит данным операторов (16 и 12% соответственно). Это расхождение в показателях связано с недостаточной репрезентативностью выборок» [35].

В любом случае, даже основываясь на результатах данных статистических исследований, можно сделать следующий вывод – доля

пищевых отходов (легко разлагаемой органической фракции) уменьшается одновременно с увеличением содержания неорганических фракции и органических отходов медленно или совсем неподверженных биодegradации, в основном это отходы упаковки (бумага, пластик, и другие содержащие лигноцеллюлозный материал отходы). Если в 2000 году на пищевые отходы в России приходилось около 40% муниципальных отходов (рисунок 1.1), то в 2018 их размер уменьшился на 6 – 10%, а доля фракций, которые могут быть переработаны, увеличилась.



Рисунок 1.1 – Экспертная оценка структуры ТКО в России

«Анализируя проблемы сбора, утилизации и рециклинга отходов в г.о. Тольятти можно отметить, что более 80 % массы ТКО отправляется на свалки. Причиной такому состоянию дел служит смешение коммунальных отходов на этапах их сбора и транспортировки. За рубежом предприятия по переработке отходов работают значительно эффективнее именно за счет сортировки ТКО по источникам еще на этапе их сбора» [18, 35, 52].

Периодические морфологические исследования ТКО г.о. Тольятти показывают, что бытовые отходы г.о. Тольятти содержат около 80 % вторичных материальных ресурсов, которые при соблюдении определенных условий, могли бы быть переработаны и использованы вновь.

Следует отметить, что к настоящему времени уже около 9% мирового спроса на энергию обеспечено за счет использования биоэнергии, тогда как, только 10,35% обеспечивается за счет других видов возобновляемой энергии [54]. Высокая доля биоэнергии в мировом снабжении была достигнута благодаря растущему интересу к использованию биомассы в качестве сырья

для производства жидкой, твердой и газообразной энергии с различными применениями по химическим, биохимическим, термохимическим и каталитическим путям [15, 65].

В промышленном масштабе наиболее важными жидкими энергоносителями являются биоэтанол и биодизель [19, 37]. Эти жидкие носители имеют хорошо зарекомендовавший себя рынок в транспортном секторе, и их внедрение путем смешивания с бензином и дизельным топливом для сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) было весьма успешным [37]. Кроме того, векторы газовой энергии, такие как биогаз и синтезгаз, могут использоваться для отопления и охлаждения, а также для выработки электроэнергии [8]. «Эти потребности в энергии достигаются посредством двух конкурентных процессов: анаэробного сбраживания и термохимической газификации. Оба процесса были реализованы в нескольких европейских странах, Соединенных Штатах и некоторых странах Латинской Америки [55]. Биогазовые установки развиваются с 2012 года. На этих заводах используется некоторое количество лигноцеллюлозной биомассы из энергетических культур и органической фракции твердых бытовых отходов. Однако не все лигноцеллюлозное сырье может быть улучшено с помощью этого процесса» [55]. С другой стороны, не все газификационные установки используют лигноцеллюлозные отходы в качестве основного сырья для получения синтезгаза.

Системы газификации набирают силу с целью сокращения использования угля. Следовательно, необходимо провести углубленное исследование подходящей биомассы, прежде чем применять некоторые из вышеуказанных вариантов для преобразования биомассы второго поколения в векторы газовой энергии.

Биогаз и синтезгаз имеют аналогичные применения с точки зрения производства энергии. Они имеют разные топливные компоненты, требования к очистке газа и теплотворной способности. Кроме того, их применимость и условия производства могут варьироваться в зависимости от типа биомассы.

## 1.2 Основы биогазовой технологии

«Производство биогаза появилось в Европе и Северной Америке в качестве альтернативного топлива для транспорта. Пять крупнейших производителей биогаза в мире – это Германия, Швеция, Швейцария, Великобритания и США» [20, 64]. Тем не менее, большая часть добываемого биогаза в Соединенных Штатах поступает из наземного газа. Между тем, сельскохозяйственные отходы используются для этой цели в Европе. Усилия, предпринимаемые такими странами, как Колумбия, Коста-Рика, Китай и «Индия, были направлены на создание инфраструктуры природного газа, в которую можно было бы включать биогаз» [21]. С другой стороны, биогаз также используется для промышленного и городского применения, с целью выработки тепла и электроэнергии в когенерационных системах [67]. Кроме того, биогаз является самым дешевым топливом, используемым для приготовления пищи, с капитальными затратами 0,17 долларов США на человека в день. Эта цена в три раза ниже цены на древесину [56].

Биогаз является основным продуктом, полученным из органического вещества или биомассы. Этот процесс может быть определен как сложная последовательность химических реакций, в которых органическое вещество разлагается и стабилизируется различными метаболическими путями, осуществляемыми консорциумом микроорганизмов в бескислородной среде.

Основным продуктом процесса анаэробного брожения является газовая смесь, состоящая в основном из метана ( $\text{CH}_4$ ) и углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Однако смесь также содержит: сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), водород ( $\text{H}_2$ ) и окись углерода ( $\text{CO}$ ).

Кроме того, так называемый сырой биогаз насыщается водой и содержит другие примеси, такие как частицы пыли и силоксаны. Кроме того, получают влажное твердое вещество или жидкость (например, дигестат), который может быть использован в качестве удобрения.

Метаногенез связан с последовательным разложением биологической массы, состоящей в основном из воды, белков, жиров, минералов, углеводов и различных штаммов микроорганизмов (бактерий), что приводит к образованию газовой смеси – так называемого биогаза. Основным его компонентом (до 85%) являются метан ( $\text{CH}_4$ ). Этот процесс разложения происходит только в анаэробных условиях (отсутствие кислорода), его обычно называют распадом (можно наблюдать в болотах) [2, 5].

Когда в среде присутствует кислород, органический субстрат разлагает другие бактерии – в этом случае процесс будет называться компостированием. Другие процессы естественного разложения – это сбраживание или ферментация.

Выделенная энергия вследствие протекания анаэробного процесса не теряется в виде тепла, как в случае с компостированием – она превращается в молекулы метана (в результате жизнедеятельности метановых бактерий).

В отсутствие кислорода абсолютно любое органическое вещество, может быть использовано для производства биогаза (анаэробный процесс). Все зависит от времени разложения, поэтому анаэробный процесс часто используется для расщепленных кашеобразных, текучих субстратов и в целом биомассы, которая задерживает большие объемы воды, в частности для очистки сточных вод, в то время как материал из крупных цельных кусков, таких как древесина лучше разложить компостированием или термохимической переработкой.

Энергетическая ценность метана, содержащегося в биогазовой смеси, составляет около  $10 \text{ кВт/м}^3$  (чистый метан), метан – это тот же газ, что и природный газ. Если газовая смесь преобразуется в электрический ток с помощью генератора (эффективность 35%), с  $10 \text{ кВт}$  брутто будет составлять  $3,5 \text{ кВт}$ , который может быть подан непосредственно в электрическую сеть [5].

### 1.3 Анаэробное сбраживание. Этапы процесса возникновения биогаза

Анаэробное сбраживание, принято делить на четыре основных этапа (рисунок 1.2), на каждом этапе принимают участие разные группы бактерий:

- 1) гидролиз;
- 2) ацидогенез;
- 3) ацетогенез;
- 4) метаногенез.

Общая реакция может быть описана как:



Этапы анаэробного сбраживания выполняются анаэробными бактериями, для большинства которых кислород «ядовит», а аммиак (NH<sub>3</sub>) является важным питательным соединением. Фосфор также важен для детального обмена веществ на каждом этапе.

	Процесс	Бактерии	Выход
I	Гидролиз	Аэробные гидролизные бактерии	Моносахариды, аминокислоты и жирные кислоты
II	Повышение кислотности	Кислотообразующие бактерии	Органические кислоты, двуокись углерода
III	Образование уксусной кислоты	Бактерии образующие уксусную кислоту	Уксусная кислота, двуокись углерода, водород
IV	Образование метана	Метановые бактерии	Метан, двуокись углерода, вода

Рисунок 1.2 – Фазы брожения

1) Гидролиз – молекулы воды находятся в равновесии  $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ , а ион водорода используется бактериями для расщепления полимеров (белков, жиров, минералов и углеводов) на простые низкомолекулярные соединения сахара (как гексозу C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, так и пентозу

$C_5H_{10}O_5$ ), аминокислоты и жирные кислоты. Аминокислоты представляют собой молекулы, содержащие аминную группу (с азотом), карбоксильную кислотную группу и боковую цепь, специфичную для конкретной аминокислоты. Карбоновые кислоты имеют структуру  $R-COOH$ , где  $R$  представляет собой некоторую одновалентную функциональную группу. Жирная кислота представляет собой карбоновую кислоту с алифатическим хвостом.

Гидролиз, вялотекущий процесс находящейся в зависимости от внеклеточных энзимов, таких как амилазы, протеазы, целлюлоза и липазы. На данный процесс оказывает влияние уровень pH (4,5 – 6) и время нахождения в резервуаре [27, 28].

2) Ацидогенез – гидролизованные соединения ферментируются бактериями в летучие жирные кислоты (имеющие меньшую молекулярную массу), такие как уксусная ( $CH_3COOH$ ), пропионовая, молочная и масляная кислоты, а также аммиак, нейтральные соединения (этанол, метанол), аммиак, водород и диоксид углерода. На этой стадии обычно получают 20% уксусной кислоты, которая используется для последующего производства метана, и 4% используемого водорода, но эти цифры варьируются в зависимости от рабочих условий. Данный этап называют фазой окисления, во время него происходит снижение уровня pH [27, 28].

3) Ацетогенез – кислотообразующие бактерии создают из органических кислот исходные для метанообразования продукты:  $CO_2$ , углерод и уксусная кислота:



Данные бактерии снижают количество углерода и очень чувствительны к температуре.

4) Метаногенез – бактериальная конверсия различных углеводов в метан:





На данном этапе вырабатывается 90% всего метана, и 70% из них образуется из уксусной кислоты. Поэтому, образование уксусной кислоты (Ацетогенез) является фактором, определяющим скорость метанообразования. Метановые бактерии 100 % анаэробные. Оптимальный уровень pH составляет 7, при амплитудных колебаниях температуры pH может быть в пределах от 6,6 до 8 [5].

Расщепление органического субстрата на отдельные компоненты и его превращение в метан происходят только во влажной среде, поскольку бактерии действуют только в растворимой форме. Поэтому для ферментации твердых субстратов необходима вода (рисунок 1.3).

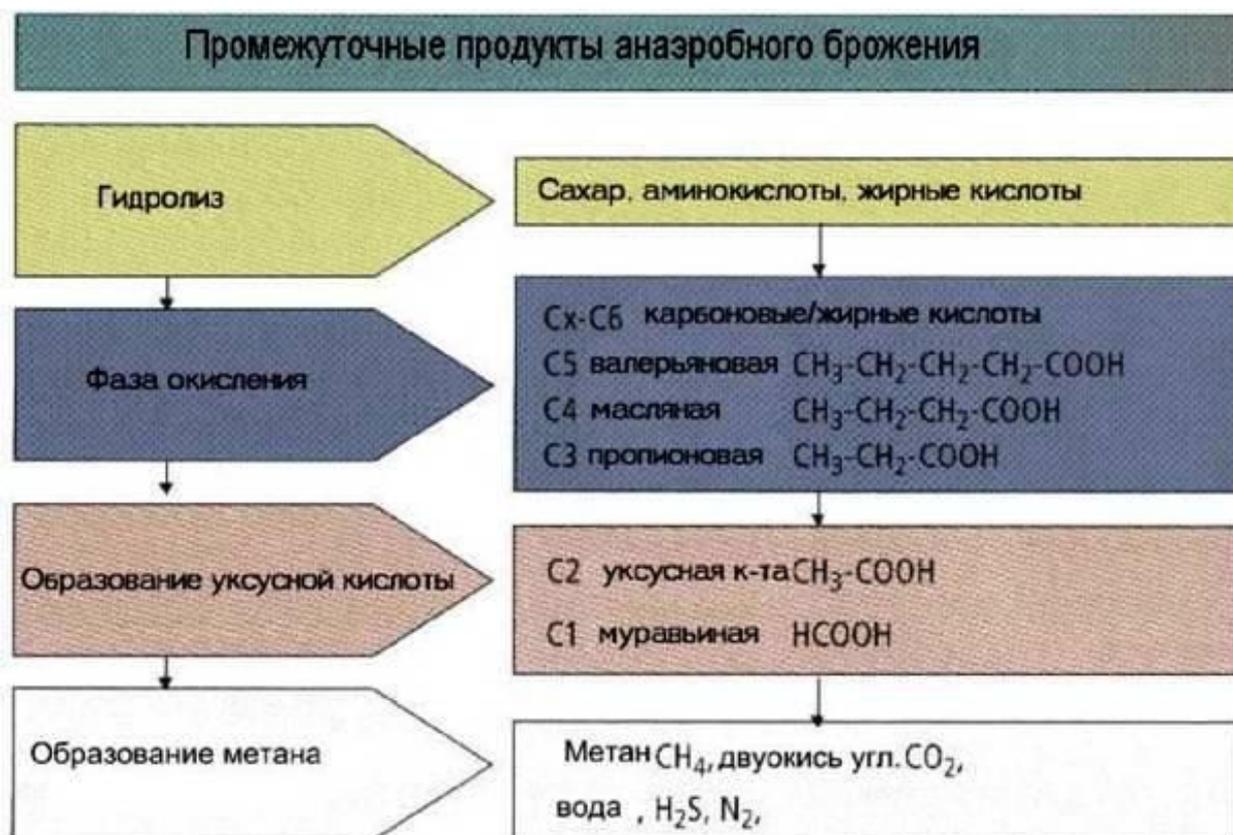


Рисунок 1.3 – Продукты обмена веществ анаэробного сбраживания

Процесс разложения таков, что продукты метаболизма (расщепления) каждого бактериального штамма служат в качестве питательных веществ для другого штамма бактерий. Фазы разложения органического биоматериала протекают с разной скоростью, так как разные штаммы бактерий работают с

разной скоростью (рисунок 1.4). Время генерации аэробных бактерий, в течении которого они успевают удвоить свой вес, составляет от 20 минут до 10 часов, этот же процесс у анаэробных бактерий занимает значительно больше времени.



Рисунок 1.4 – Время жизни поколений бактерий

Фазообразование уксусной кислоты длится несколько дней – это наиболее медленная фаза роста бактерий для удвоения своей массы. Среди метановых бактерий также имеются несколько медленных штаммов, прежде всего это чистые культуры с фазой образования 3 – 5 дней. Оставшаяся уксусная кислота фракционируется в метане в течение нескольких часов.

Быстроразлагаемая биомасса приводит к перекармливанию бактерий и накоплению кислоты ацидогенными бактериями [5,12], что приводит к резкому падению рН, при котором другие штаммы бактерии не выживают.

«Динамическое равновесие также зависит от легкости разрушения биомассы. Например, крахмал и сахар расщепляются очень быстро, что требует минимального времени ферментации. Очевидно, что чем сложнее структура субстрата, тем больше времени занимает его расщепление» [37].

В результате скорость деградации биомассы напрямую влияет на время ферментации и на саму технологию производства биогаза (рисунок 1.5). Поэтому при проектировании биогазовой установки (метанового резервуара) следует четко понимать, какие субстраты будут применяться в процессе ферментации.



Рисунок 1.5 – Скорость разложения субстрата

#### 1.4 Одно- и многоступенчатые процессы получения биогаза в биореакторных установках

Стандартные биогазовые установки, в основной своей массе, являются установками параллельного типа, т.е. процессы расщепления в них не разделены, ни территориально, ни во времени. Такой процесс называют одноступенчатым.

С целью увеличения производительности биогазовых установок для быстроразлагающихся биомасс используют двухступенчатый процесс, который реализуется за счет применения отдельных резервуаров для процессов гидролиза и окисления (так как такая быстродеградирующая биомасса склонна к окислению), продукты разложения из которых поступают в биореактор (рисунок 1.6).

Преимущество этой схемы заключается в поддержании оптимальных условий жизни бактерий (в первую очередь уровня рН). Следовательно, можно достичь большей производительности биогаза. Неоспоримым преимуществом такой схемы является то, что неиспользуемые газы могут быть разделены через биофильтр, поэтому можно выделять только газ с высоким содержанием метана.

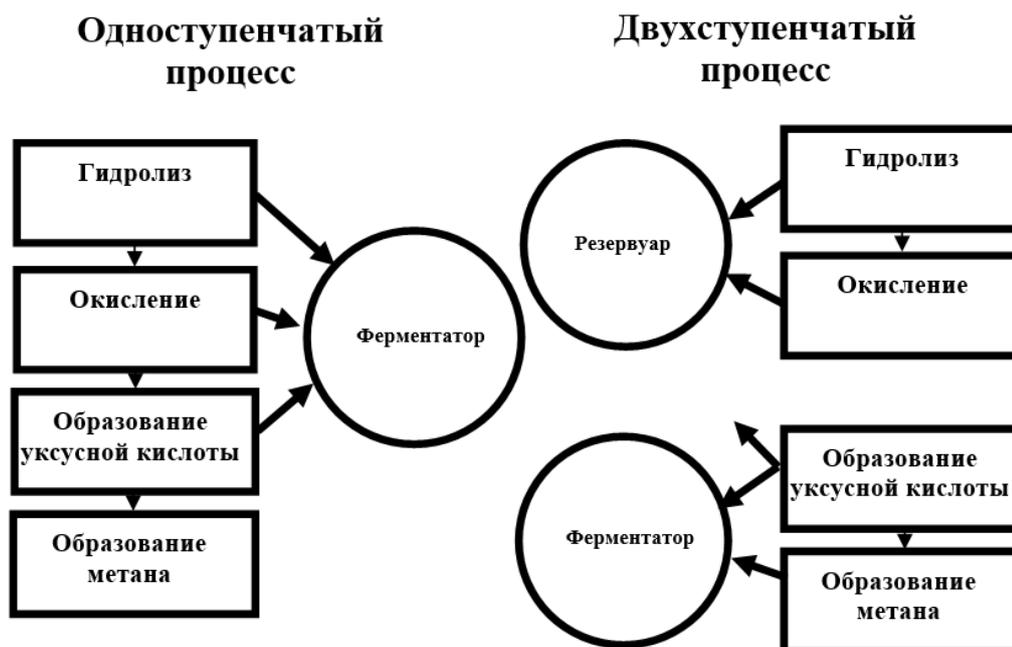


Рисунок 1.6 – Одно- и двухступенчатый процесс

«Несмотря на это преимущество, двухступенчатые технологии не получили широкого распространения из-за дополнительных потерь для второго резервуара, системы смешивания, отопительного и насосного оборудования» [26, 28]. Однако на практике часто имеется два попеременно связанных друг с другом резервуара. Там, где первый танк действует как ферментер, с подогревом и смесителями – он предназначен для быстрой ферментации быстро разложившихся масс. И второй резервуар, добавленный к первому, представляет собой ферментер без нагрева, в котором газ получается из субстратов, которые разлагаются медленнее, следовательно, и процесс длится дольше [26 – 28].

## 1.5 Количественный и качественный состав биогаза

Вырабатываемый в биогазовых установках биогаз, в среднем состоит:

- метан: 50 – 87%;
- углекислый газ: 13 – 50%;
- остальное: ( $H_2$  и  $H_2S$ ).

«Поскольку только метан подает энергию из биогаза, принято описывать качественные и количественные показатели биогаза, принимать нормализованные показатели метана. Поскольку объем газов и уровень его калорийности зависят от температуры, давления и влажности, а также от того, что выходы газа могут сравниваться друг с другом, необходимо сопоставить их с нормальным состоянием (атмосферное давление 1,01325 бар, температура 0 °С, 0% относительной влажности)» [45 – 47].

Данные по добыче газа выражены в литрах или кубометрах метана на 1 кг органического сухого вещества.

## 1.6 Сырье для генерации биогаза

В качестве сырья для биогаза, из органической фракции отходов ТКО приемлемы: навоз, мелассы после спирта и зернового барда, птичий помет, отходы из забойных и рыбных производств, зерновых пива, бытовых отходов, трав, отходов биодизеля, молочных отходов, отходов производства соков, отходов производство крахмала, водоросли, бытовые коммерческие отходы (общепит, рынки, ярмарки и т. д.) [61, 72].

Также возможно извлекать биогаз из сбраживания специальных селективных энергетических культур, таких как силосная кукуруза.

Объем получаемого биогаза зависит от содержания сухого вещества и типа используемого сырья. Тонна навоза крупного рогатого скота (КРС) позволяет производить в среднем от 50 до 60 м<sup>3</sup> биогаза (60% метана). Различные типы растений позволяют получать выход по биогазу от 150 до 500 м<sup>3</sup>, содержанием метана ~ 70%. Максимальный выход биогаза может быть достигнут при сбраживании жиров – до 1300 м<sup>3</sup> и содержанием метана до 88% [44].

Существуют теоретические (возможны физически) и технически осуществимые возможности выхода газа. Во второй половине 20-го столетия технически возможный выход газа не превышал 20 – 30% от теоретического значения [5, 41]. В настоящее время разработка технологий позволяет получить выход биогаза близко к теоретическим (до 95%).

При расчете производства биогаза мировая практика использует понятие сухого вещества (СВ) или сухого остатка (СО). Вода, содержащаяся в биомассе, не производит газа.

В среднем от 1 кг сухого вещества на практике получается 300 – 500 литров биогаза [2, 11, 26, 27].

### **1.7 Биогаз в сравнении с другими газами**

Количественный и качественный состав биогаза во многом зависит от исходных материалов и технологических процессов и стратегий стартового процесса. Оценка стратегий запуска может быть выполнена при использовании трех типов реакторных конфигураций. Во-первых, проведение серийных экспериментов для оценки самых высоких накоплений биогаза и метана конкретных субстратов и/или процесса совместного сбраживания [58], когда имеется достаточный запас углерода и питательных веществ, подходит конфигурация, «одного кормления», то есть, добавление бактерий в реактор после его запуска рассматривается как препятствие для данного типа реактора. Если не удалить с помощью биологически опосредованных процессов, все субстраты, микроорганизмы, ферменты и продукты, накопившиеся в реакторе, то накопление тормозящих промежуточных продуктов в гомеостатических пороговых концентрациях может привести к ингибированию метаболических реакций в реакторах. Во-вторых, в качестве альтернативы используют системы с периодической или непрерывной загрузкой, которые выгодно превосходят реакторы пакетной (разовой) загрузки [58], они работают без удаления ферментационного бульона, и, самое главное, концентрация всех соединений сохраняется на низком уровне все время по сравнению с пакетными/разовыми биореакторами. В-третьих,

используют непрерывные реакторы с мешалкой (CSTR) [7], обеспечивающие более стабильное состояние процесса сбраживания, избегая при этом накопления токсичных элементов. В таблице 1.1 представлено сравнение состава биогаза и его характеристик в зависимости от исходного материала.

В целом, для успешного запуска процесса и во избежание накопления промежуточных продуктов, таких как летучие жирные кислоты (VFA) и водород (которые могут ингибировать стадию метаногенеза) такие параметры, как происхождение, состав инокулята и стратегия питания должны быть тщательно разработаны. Таким образом, важно решить проблемы, указанные выше, чтобы гарантировать оптимальную и стабильную работу процесса.

Таблица 1.1 – Характеристики газов

	Биогаз	Газ сточных вод	Газ мусорных свалок	Природный газ
CH <sub>4</sub>	50 – 75	65	50	88
CO <sub>2</sub>	25-50	35	27	–
N <sub>2</sub>	0 – 5	–	23	5
Плотность (кг/ м <sup>3</sup> Н)	1,2	1,16	1,274	0,798
Теплотворная способность (кВт-ч/ м <sup>3</sup> Н)	5,0 – 7,5	6,5	4,8	10,1
Метановое число	124 – 150	134	136	80 – 90

### 1.8 Благоприятная среда для образования бактерий

Благоприятная среда для бактериальных штаммов, является необходимым комплексом условий (влажность, уровень рН, температура и т.д.) для осуществления процессов анаэробного брожения биомассы [28, 43].

### *Влажная среда*

Основным условием распространения метанообразующих бактерий является растворение субстратов в воде (50% и более воды), поскольку, в отличие от аэробов, грибов и дрожжей, они не могут находиться в твердой фазе. Поэтому требуется увлажнение биоматериала, при этом не имеет значения, является ли биомасса влажной изначально или стала таковой в процессе перемешивания и добавления воды [42, 43, 49].

### *Исключение проникновения воздуха*

«В анаэробном процессе разложения органического материала участвуют целые группы бактерий. Около 40% бактерий являются аэробными или частично аэробными. Метанообразующие же бактерии могут быть только анаэробными. Если в субстрате присутствует кислород (например свежий навоз), то его сначала используют аэробные бактерии (первая фаза процесса производства биогаза). Открытие смотровых окон, используемое также для выхода серы, обеспечивает минимально необходимое проступание кислорода для аэробных штаммов бактерий, что является достаточным условием для протекания процесса сбразивания» [42, 43, 49].

### *Исключение проникновения света*

Свет является неблагоприятным фактором для устойчивой активности бактерий, потому что он замедляет процесс органического разложения биоматериала. На практике влияние света на процесс брожения устраняется непрозрачными крышками [42, 43, 49].

### *Равномерная температура*

Активная работа метанообразующих бактерий колеблется в диапазоне температур 0 – 70 °С. За исключением некоторых штаммов (сохраняющих свою жизнедеятельность и при 90 °С), температуры выше 70 °С приводят к их гибели (рисунок 1.7). При температуре ниже 0 °С и активность метанообразующих бактерий равна «0», при том что сами бактерии не погибают. Согласно данных [34] минимальная температура, необходимая для

активности метанообразующих бактерий, составляет 34 °С.

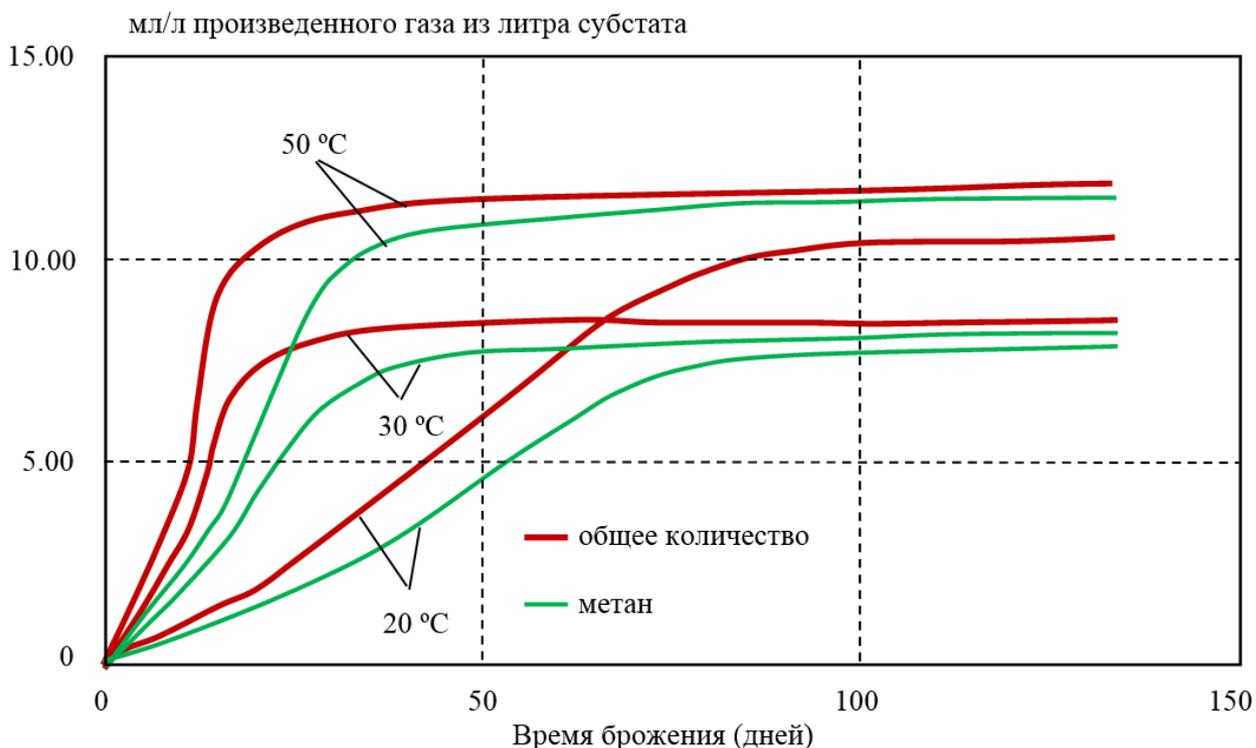


Рисунок 1.7– Влияние температуры на количественный выход газа

Температура имеет решающее значение для процесса ферментации – чем выше, тем быстрее процесс биodeградации и тем больше выход газа. Однако при сокращении общего времени сбраживания процентное содержание метана в сыром биогазе уменьшается, поскольку  $\text{CO}_2$ , растворенная при высоких температурах в биомассе, быстрее превращается в биогаз.

Существует три общепринятых температурных диапазона благоприятных для определенных бактериальных групп:

- психрофильный (< 25 °С);
- мезофильный (25 – 45 °С);
- термофильный (>45 °С).

подавляющее большинство биогазовых установок сконструировано для работы в мезофильном режиме.

Согласно статистике, основные рабочие диапазоны температур работы

биогазовых установок находятся в пределах от 38 до 42 °С. Психофильный режим работы, вследствие своей низкой производительности и длительности процесса ферментации широкого распространения в наших широтах не получил, в то время как термофильные биореакторы наиболее очень востребованы и продолжают набирать популярность.

Зависимость бактериальной активности от температуры ферментера проиллюстрировано на рисунке 1.8. Повышение температуры приводит к увеличению чувствительности бактерий к колебаниям температуры, (особенно к кратковременным). На графике это видно из узкого максимума кривой и резкого ее падения при термофильном диапазоне температур. В мезофильном диапазоне, колебания 2 – 4 °С в день не оказывают существенного влияния на бактерии, а колебания в термофильном диапазоне не должны превышать 1 °С[42, 43, 49].

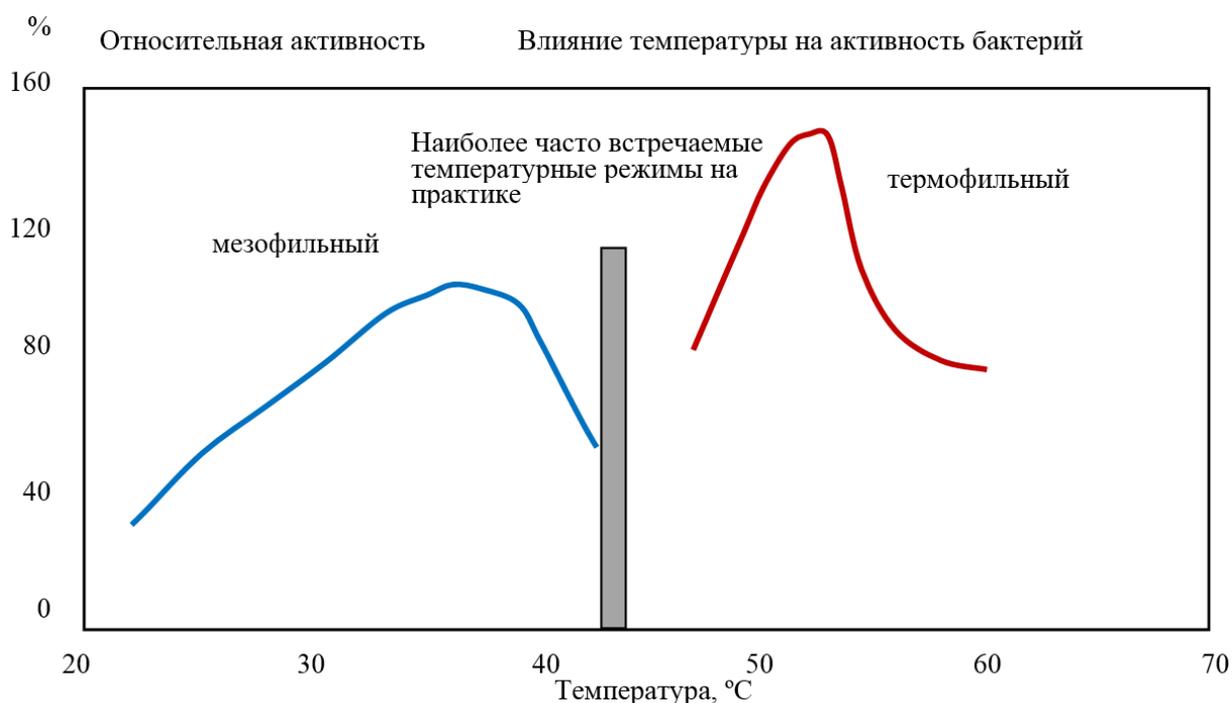


Рисунок 1.8 – Влияние температуры на активность бактерий

Большие количества легко разлагаемого субстрата, такого как растительная биомасса, неизбежно приводят к реакциям окисления и выделения тепла. Поэтому во время ферментации наблюдается рост температуры с 37 °С до 42 °С. Этот эффект значительно снижает потребление

тепла реактором биогазовой установки, данное обстоятельство следует учитывать еще на этапе проектирования оборудования и в частности внедрять системы автоматизации. В наши дни интеграция биогазовых установок в повседневную работу сельскохозяйственных компаний и малого индивидуального хозяйства «мезофильное» оборудование предпочтительней, ввиду простоты его обслуживания. Если же речь идет о жилых комплексах или больших хозяйствах, где требуется производительность, то более подходящими можно считать «термофильные» системы.

### *Уровень рН*

Для активности кислотообразующих и гидролизующих бактерий в кислых средах оптимальный рН находится в диапазоне 4,5 – 6,3. Для метанообразующих бактерий и уксусную кислоту жизненно важным условием является слабощелочная или нейтральная среда (рН от 6,8 до 8).

В целом, можно сделать следующее утверждение о жизнеспособности и активности любых штаммов бактерий [32, 40]:

- Бактерии теряют свою активность при уровне рН выше оптимального значения, соответственно снижается конечный выход биогаза.

- Для оптимального протекания одноступенчатых процессов, уровень рН следует выдерживать в пределах, установленных для метанообразования (рН = 7). Уровень рН может изменяться, под влиянием, как количества субстрата, так и его разновидности. Внезапное снижение уровня рН может быть вызвано быстроокисляемыми субстратами, следовательно, их добавление целесообразно в ограниченных партиями.

- Биомассы различны (в зависимости от сырья и др. факторов), следовательно, отличается и их способность амортизировать рН. По мере увеличения концентрации Н<sup>+</sup> субстраты могут выравнивать уровень рН, с свободными ионами. В результате рН остается (в среднем) стабильным. После исчерпания способности связывания (и выравнивания), рН увеличивается. Так как замеры уровня рН не отражают реальной картины, данный метод контроля и управления процессом является не эффективным

[59]. Поэтому более эффективным является замер буферных свойств.

Особенно важными для буферного эффекта являются аммониевые и карбонатные буферы:



Ион гидрокарбоната + ион водорода

$\leftrightarrow$  угольная кислота

После активации карбонатного буфера в кислой среде с высоким рН, используется аммонийный буфер.

Среди органических отходов, наиболее богатым на наличие буферных веществ является КРС, вследствие чего он позволяет успокаивать колебания уровня рН, а также поглощают чрезмерную кислотность.

При разложении органических отходов буфер аммония играет первостепенную роль, так как возобновляемые ресурсы не обладают очень важным карбонатным буферным потенциалом, следовательно, устанавливается более высокий уровень рН. В стабильных процессах разложения происходит саморегуляция уровня рН.

#### *Подача питательных веществ*

Чтобы бактерии могли создавать свои собственные клетки, необходимы питательные вещества (витамины, растворимые соединения азота, микроэлементы и минералы) [50].

При смешивании питательных веществ принято использовать следующие ориентировочные соотношения:

1. C : N : P = 75:5:1 или 125:5;
2. C : N = 10:1 или 30;
3. N : P = 5.

Согласно соотношению, между углеводами и азотом видно, что 5% азота и 75% углерода соотносят с 1% фосфора. Наилучшее соотношение углерод-азот составляет 30: 1 и 10: 1. Этот расчет соотношения веществ может быть сделан для любого типа или смеси субстратов [68].

Тяжелые металлы положительно влияют на жизнеспособность

бактерий (но в небольших количествах), при этом они также могут оказывать замедляющее и даже токсическое действие на них.

Ni, Mo, Fe, Co и W являются металлами, наиболее необходимыми бактериям для производства ферментов [23].

Ввиду способности микроорганизмов, с течением времени, адаптироваться к неблагоприятным условиям питательной среды, производство биогаза может происходить, как в среде с большим разнообразием питательных веществ и высокой их концентрацией, так и наоборот.

#### *Максимальный выход газа*

Получение точных данных о максимально возможном выходе биогаза для всех условий процесса разложения, невозможно, ввиду очень большого разнообразия различных составов субстратов.

В среднем выход газа при температуре обработки ~ 32 °С относительно количества разложившейся биомассы будет находиться в диапазоне  $Y_{\text{общ}} = 0,8 - 1,0 \text{ м}^3$  на 1 кг разложившейся биомассы [25].

Выход газа в расчете на единицу, помещенной в реактор биогазовой установки биомассы, составит  $Y_{\text{общ}} = 0,4 - 0,6 \text{ м}^3$  на 1 кг помещенной в реактор биомассы. В результате порядка 40 – 50% от общего веса помещенной в реактор биомассы подвержено разложению. Чтобы произвести необходимое количество газа из различных типов органических веществ, необходимо определить продолжительность соответствующего процесса ферментации каждого из них, при этом следует учесть, что выход газа в единицу времени сначала увеличивается, а затем по достижению максимума, постепенно снижается [30,31,33].

#### *Технологическое время брожения*

Выбор времени пребывания органического материала в реакторе зависит, с одной стороны, от скорости реакции (индивидуально для каждого типа субстрата), с другой стороны, от конкретной степени разложения и, в свою очередь, определяет выход биогаза и снижение интенсивности запаха

ферментированной биомассы. Также принимается во внимание, что содержание метана в общем количестве полученного биогаза тем больше, чем дольше субстрат остается в реакторе. В то же время содержание угарного газа уменьшается, что значительно улучшает качество получаемого газа. Поэтому нет общих рекомендаций относительно выбора оптимального времени пребывания органических веществ в биореакторе.

### **1.9 Анаэробный пиролиз отходов**

Одной из прогрессивных альтернатив сжиганию служит пиролиз органической составляющей ТКО, который находит все более широкое распространение среди методов переработки как за рубежом, так и в России [9]. Использование пиролиза вместо сжигания значительно снижает количество газообразных выбросов и содержание токсичных компонентов. Кроме того, можно получать энергетические и материальные ресурсы путем извлечения топлива и других побочных продуктов из отходов. Рекомендуется пиролизовать не компостируемые бытовые отходы (НБО) и неиспользованные отходы, в основном содержащие органические вещества.

Анаэробный пиролиз – это процесс термического разложения отходов без доступа кислорода, в результате которого образуются пиролитический газ, жидкие и твердые углеродные остатки.

Количество и состав продуктов пиролиза зависят от состава отходов и температуры их разложения. Пиролиз не компостируемых отходов способствует производству безотходных и малоотходных технологий, а также рациональному использованию природных ресурсов.

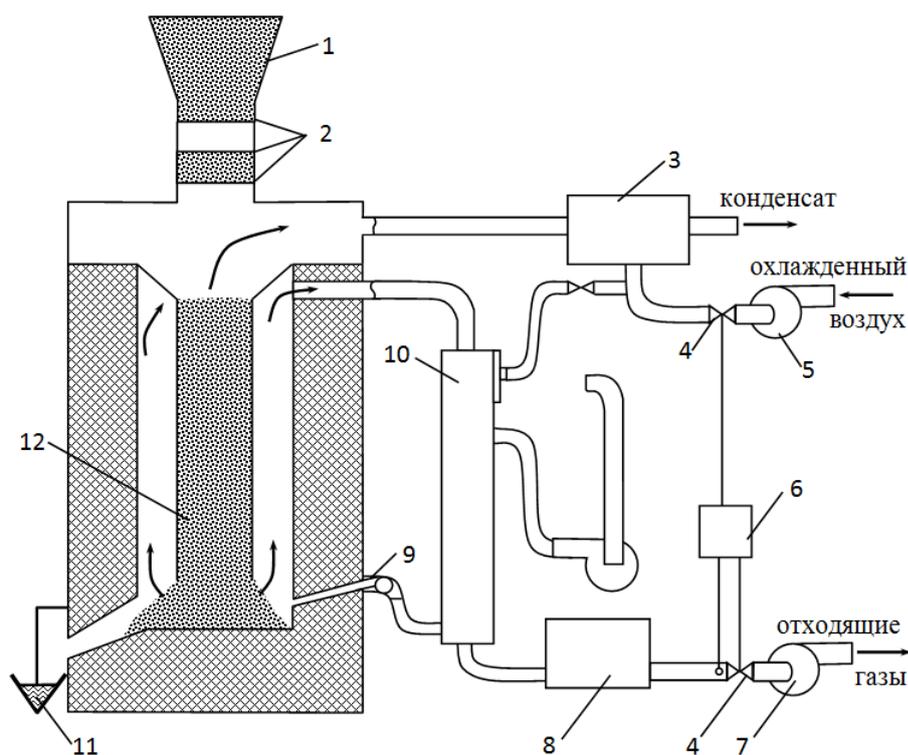
В зависимости от температурных условий процесса установки пиролиза делятся на:

– низкотемпературные (450 – 500 °С), характеризующиеся минимальным выходом газа, максимальным количеством смол, масел и твердых остатков;

– среднетемпературные (до 800 °С), характеризующиеся более высоким выходом газа с уменьшенным количеством смол и масел;

– высокотемпературные (выше 800 °С), характеризующиеся максимальным выходом газа и минимальным количеством смоляных продуктов.

Основным узлом пиролизного оборудования является реактор(печь со встроенным резервуаром) и система извлечения газа, которая предотвращает смешивание пиролизных и выхлопных газов (рисунок 1.6).



1 – приемная воронка, 2 – затворы, 3 – конденсатор жидких продуктов, 4 – дроссельные заслонки, 5 – вентилятор, 6 – газоанализатор, 7 – дымосос, 8 – система газоочистки, 9 – сопло подачи подогретого воздуха, 10 – воздухоподогреватель, 11 – водяная ванна, 12 – резервуар (шпельшахта)

Рисунок 1.6 – Схема установки высокотемпературного пиролиза

Больше чем 90% отходов НБО подвергаемых пиролизу – органический материал, в основной массе которых соотношение углерода, водорода и кислорода соответствует их соотношению в целлюлозе ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>. К примеру бумага ~ 100% целлюлозы; текстиль ~ 90%; древесина около 50%. При

термической анаэробной переработке целлюлозы она разлагается и образует великое множество различных продуктов.

Процентное соотношение, качественный и количественный состав получаемых газообразных, жидких и твердых продуктов анаэробного пиролиза зависят от условий протекания процесса и состава исходного сырья.

Вредным составляющим НБО являются сера (основным источником которой служат резинотехнические изделия; хлор(выделение происходит при сжигании полимеров); оксиды азота; соединения фтора.

Чтобы защитить воздух от загрязнения, выхлопные газы должны быть тщательно очищены как от золы, так и от химических веществ.

Общее количество загрязняющих веществ, выделяющихся в процессе пиролиза, находится в пределах 50 % от выделения загрязнений при сжигании ТКО того же объема на мусоросжигательных заводах (МСЗ).

Рассматривая четыре основных метода термохимической конверсии органических отходов, таких как пиролиз, карбоксилолиз, газификация и сжигание, а также с учетом того, что темой моего исследования являются анаэробные методы переработки, именно пиролиз является наиболее перспективным. Именно пиролиз, позволяет перерабатывать трудно утилизируемые твердые древесные отходы и биомассу, с попутным производством полезного топлива. Медленный и быстрый пиролиз различаются по составу и количеству получаемого сырья. Практические варианты пиролиза приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные рабочие параметры процессов пиролиза

Пиролиз	Скорости нагрева, °С / с	Температура пиролиза, °С	Размер частиц, мм	Основная продукция
Медленный	$\ll 1$	550 – 700	5 – 50	углистый остаток газ, нефть

Продолжение таблицы 1.2

Пиролиз	Скорости нагрева, °С / с	Температура пиролиза, °С	Размер частиц, мм	Основная продукция
Быстрый	10 – 200	450 – 650	<1	75% биомасла, 12% углистого остатка, 13% газа
Флеш-пиролиз	1000	<650> 650 1000	<0,2	биомасло, газ

### 1.9.1 Быстрый пиролиз органических отходов

Пиролиз биомассы в зависимости от переменных процесса, таких как температура в реакторе и время пребывания ее в нем, дает различные количества газообразных, жидких и твердых продуктов различного состава. Например, обычный пиролиз, который использовался в течение сотен лет, включает более низкие температуры и более длительное время пребывания, при этом основным продуктом является твердый уголь. Напротив, быстрый пиролиз включает умеренно высокие температуры (~ 500 °С) и короткое время пребывания (~ 2 с), при этом основным продуктом является темно-коричневая жидкость (биомасло) наряду с другими газообразными, жидкими и твердыми продуктами, включая уголь. Этот процесс гораздо чаще используется в настоящее время по сравнению с обычным пиролизом (рисунок 1.7).

В виду того, что большинство отходов сельского и лесных хозяйств, а также увеличение составляющей упаковочного материала (картон/бумага и т.д.) в общем объеме твердых коммунальных отходов, содержащих гемицеллюлозу, целлюлозу и лигнин – применение технологии быстрого пиролиза наиболее предпочтительно. Процесс пиролиза обычно требует около 15% энергии, доступной в сырье, что может быть обеспечено сгоранием полученного сгенерированного пиролизного газа (синтезгаза) или полукокса. Стоит

обратить внимание, что уголь и газ являются двумя основными побочными продуктами пиролиза, которые обычно содержат около 25 и 5% энергии в сырье, соответственно. Другие средства подачи необходимой энергии могут включать сжигание биомасла, свежей биомассы или ископаемого топлива в зависимости от конструкции реактора и региональных условий.

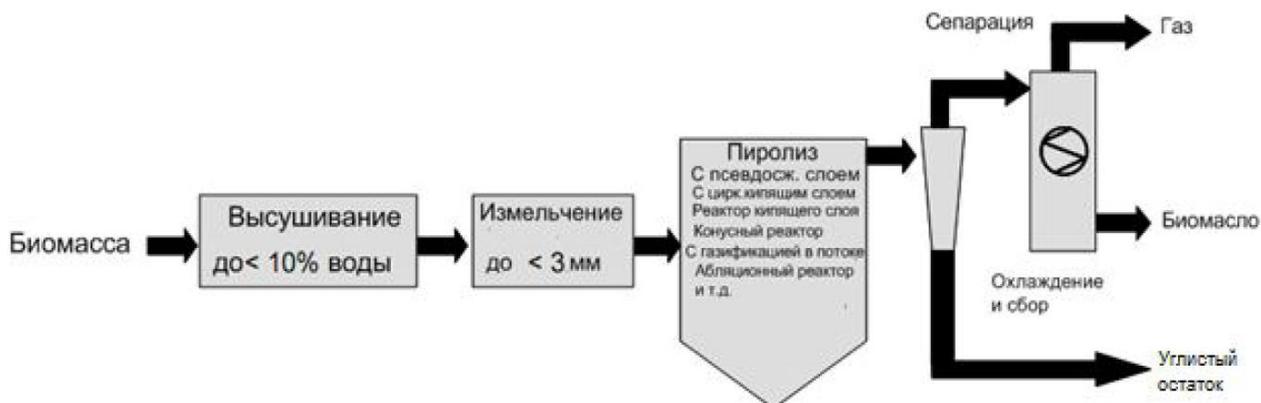


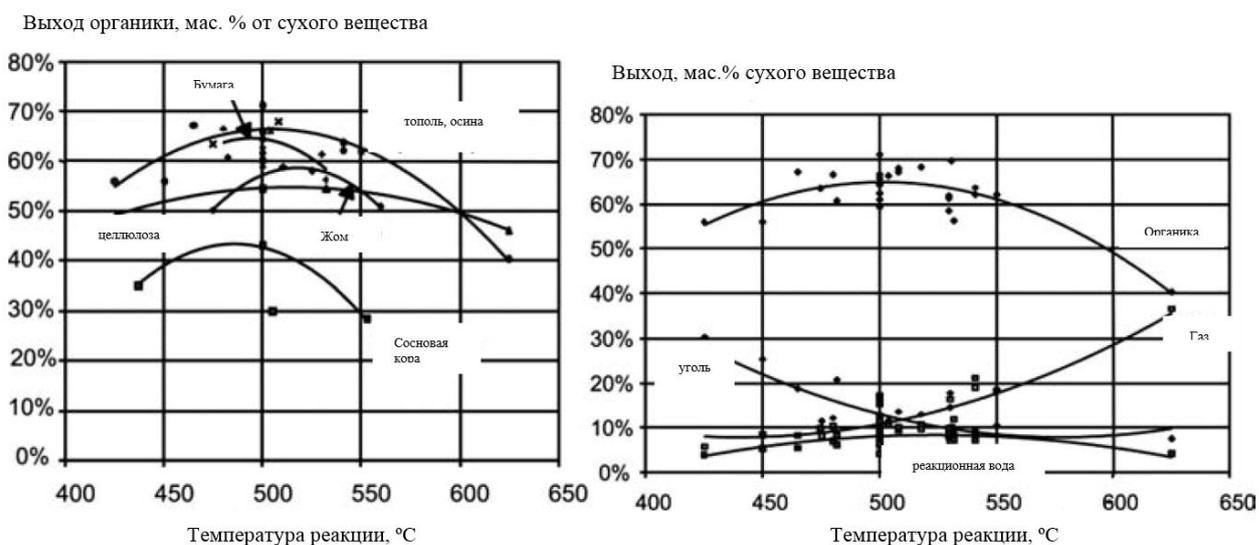
Рисунок 1.7 – Технологическая схема процесса быстрого пиролиза

Как указывалось, ранее, быстрый пиролиз в целом включает в себя высокие скорости нагрева с температурой реакции около 500 °С, быстрое охлаждение паров пиролиза с образованием биомасла, являющегося основным продуктом, и быстрое удаление обуглившегося продукта для минимизации крекинга паров. Он характеризуется сильно связанными процессами тепломассопереноса, фазового перехода и химической кинетики, критическим фактором является доведение реагирующих частиц биомассы до оптимальной температуры и минимизация их воздействия на более низкие температуры, которые способствуют образованию древесного угля. «Хотя было проведено много исследований механизмов кинетического и термического разложения для пиролиза растительной биомассы, различные процессы, связанные с быстрым пиролизом, как правило, недостаточно понятны» [3, 53].

### 1.9.2 Продукты быстрого пиролиза органических отходов

Основным продуктом быстрого пиролиза является биомасло (~ 75%), темно-коричневая жидкость, которая имеет примерно такой же элементный

состав, что и исходная биомасса. Она состоит из сложной смеси насыщенных кислородом углеводородов с различным, но заметным количеством воды (как правило, 20–30% по весу в зависимости от исходного биосырья), как от исходной влаги, так и от продукта реакции. Присутствие воды делает биомасла несмешиваемыми с топливом, полученным из нефти. Анализ биомасла дает примерный вид химической формулы:  $\text{C}_\text{H}_{1.9}\text{O}_{0.7}$ . Образованию биомасла главным образом способствует целлюлоза, а при ее разложении образуются ангидроцеллюлоза и левоглюкозан. Обычно теплотворная способность биомасел составляет около 20 МДж/кг, что составляет около 45% от углеводородного топлива (бензин – 44 МДж/кг, дизельное топливо – 42 МДж/к [39]). Рисунок 1.8, а показывает типичные выходы органики из разных видов сырья и их изменение в зависимости от температуры, в то время как на рисунке 1.8, б отобразена температурная зависимость четырех основных продуктов, а именно органики, угля, газа и воды, из типичного биосырья.



а – зависимость выхода органики от разных видов сырья и их изменение в зависимости от температуры, б– выход сухого вещества от температуры  
 Рисунок 1.8 – Зависимость выхода сухого вещества от температуры

Полукокс (ококсованный остаток), чаще называемый «биоуголь», является другим основным продуктом быстрого пиролиза органических отходов (~ 15% по весу и 25% от первоначальной энергии биомассы). Он содержит неорганические и непрореагировавшие органические твердые

вещества, а также углеродистые остатки и образуется главным образом в результате разложения лигнина, его свойства во многом, аналогичные обыкновенному углю.

Биоуголь от быстрого пиролиза очень легко воспламеняется (температура самовоспламенения от 200 до 250 °С), что похоже на порошкообразный уголь. Зольность полукокса примерно в 6 – 8 раз выше, чем в исходном сырье, а содержание щелочи в нем высокое. Теплотворная способность 26 МДж/кг.

Пиролизный газ представляет собой смесь горючих газов CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>, гидрокарбонатов, следов N<sub>2</sub> и сульфатов. Количество газа зависит от многих факторов, включая тип реактора, сырье и т.д. Количество газа, образующегося в процессе пиролиза, достаточно (за исключением, так называемого «флеш-пиролиза») для поддержания собственных нужд, то есть для поддержания процесса пиролиза без дополнительных источников энергии. Этот газ обычно имеет теплотворную способность порядка 13 – 15 МДж/м<sup>3</sup> (природный газ – 37 МДж/м<sup>3</sup>) [4, 22].

### **1.10 Использование продуктов пиролиза и анаэробного сбраживания**

Технологии анаэробного сбраживания, и термохимической переработки – это процессы практически с нулевыми отходами, поскольку продукты: биомасло, пиролизный и биогаз, полукокс (биоуголь), и отработанный дигестат, имеют коммерческую ценность.

*Биоуголь.* Уголь можно использовать в качестве источника тепла для процесса пиролиза, а в некоторых металлургических процессах – вместо кокса. Уголь от пиролиза может также использоваться в качестве удобрения отдельно или в смеси с почвой и песком (чернозем: 70% уголь: 30% почва и песок), обеспечивая рециркуляцию ценных минералов в почву. Уголь улучшает текстуру почвы, медленно обогащая ее, высвобождая оставшиеся питательные вещества и воду; кроме того, он действует как поддержка

организмов. Биоуголь также используется для производства активированного угля, увеличивая добавленную стоимость материала.

В промышленности ококсированный остаток применяется для очистки сточных вод, в качестве сорбентов для газов, аэрозолей. Биоуголь находит применение и в качестве средства для сбора разлитой нефти и нефтепродуктов.

Существует много других интересных применений угля, например, использование угольной золы в качестве углеродной ловушки, то есть поглотителя углекислого газа и последующего его хранения в почве. Уголь устойчив к биоразложению в течение нескольких десятилетий.

*«Биомасло.* Производство биомасла превращает сырую биомассу в жидкость с плотностью энергии в 6 – 7 раз выше, чем у исходного сырья, при этом его можно транспортировать обычными способами (автоцистерны). Работа промышленных предприятий с жидким топливом, также снижает капитальные вложения и эксплуатационные расходы, и, кроме того, с жидкостями легче обращаться»[24].

Биомасло экономически целесообразно использовать для замены мазута в горелках и котлах для производства тепла и электроэнергии, так как в отличие от твердого топлива, оборудование требует лишь незначительных, а порой и вовсе не требует модификаций для работы на биомасле. Кроме применения биомасла для сжигания и генерации тепла, оно может быть использовано при совместном сжигании для выработки электроэнергии. Как правило, на электростанциях, работающих на угле, можно сжигать биотопливо и полукокс, что соответствует 85% эффективности использования энергии из биомассы в топливо. Биологическое масло было испытано на электростанциях, работающих на природном газе, и результаты показали, что его можно использовать совместно, что приводит к 70% -ной энергоэффективности биомассы в топливо.

Дизельные двигатели обеспечивают высокий КПД (до 45%) в производстве электроэнергии, также могут использоваться в комбинированных тепловых и энергетических процессах. Дизельные двигатели обладают высоким отношением мощности к теплу и

поддерживают высокую эффективность даже при частичной нагрузке, отличительной их способностью является возможность использования относительно обширного спектра топлива в работе [57] были успешно проведены испытания с использованием среднескоростного дизельного двигателя, работающего на биомасле. Они пришли к выводу, что вспомогательное топливо следует использовать во время запуска из-за плохих свойств воспламенения биомасла. Однако после воспламенения биомасло легко сжигается. Уровни выбросов с точки зрения CO, NO<sub>x</sub>, и дыма были аналогичны эталонным видам топлива. Биомасло также используется в газовых турбинах электростанций, что требует незначительных конструктивных изменений турбины. Использование биомасла в газовых турбинах исследуется с 1980-х годов. В этих первоначальных испытаниях измеренная эффективность сгорания составляла 95%, однако по прогнозам, при оптимальных условиях, она может превысить 99%. При хороших условиях эксплуатации газовых турбин, работающих на биомасле, выбросы аналогичны по сравнению с дизельным топливом или мазутом, в то время как выбросы SO<sub>2</sub> практически отсутствуют [69]. Основной проблемой использования биомасла является содержания в нем различного количества органических кислот, что вызывает коррозию материалов (например, стали и алюминия). Щелочь (особенно металлов калия и натрия) в биомасле может образовывать легкоплавкие соединения, которые прилипают к лопаткам горячей турбины, что и впоследствии разъедают эти компоненты (щелочная горячая коррозия). Однако недавно биомасло успешно использовалось в промышленных турбинах (<2,5 МВт) компанией Dynamtivation Energy Systems в сотрудничестве с Orenda Aerospace Corporation, использующей газовую турбину OGT 2500 с антикоррозионным покрытыми лопаток.

Если учесть, что согласно прогнозам, спрос на жидкое топливо (дизельное топливо и бензин) к 2040 году увеличится на 75%, легко понять, что существует повышенная потребность в улучшенном топливе более

высокого качества. Поэтому низкая теплотворная способность, несовместимость с обычным топливом, высокая вязкость, низкая летучесть и химическая нестабильность связаны с содержанием кислорода в биомасле.

Таким образом, основная задача всех стратегий конверсии биомассы состоит в том, чтобы эффективно удалять кислород из исходного сырья, полученного из гидрофильной биомассы, и превращать его в гидрофобную с соответствующими свойствами горения или химическими свойствами. Некоторые из этих недостатков можно исправить, используя физические методы, в то время как другие требуют более сложной химической обработки для полной перестройки молекул.

Самым простым способом использования биомасла в качестве топлива для транспорта является непосредственное сочетание с дизельным топливом. Хотя биомасло не смешивается с углеводородами, его можно эмульгировать с помощью поверхностно-активных веществ. Однако, несмотря на то, что эмульгирование не требует избыточных химических превращений, нельзя недооценивать высокую стоимость поверхностно-активных веществ и потребление энергии для эмульгирования.

*Пиролизный и биогаз.* Пиролизный газ обычно используют в качестве источника энергии, благодаря высокому содержанию в нем углеводородных компонентов, он обладает высокой теплотворной способностью (рисунок 1.9).

Большая часть очищенного пиролизного газа может быть использована в качестве источника энергии в печах и промышленных паровых котлах. В последнее время также получает широкое распространение использование его как газового топлива в бензиновых двигателях и газовых турбинах [66].

Область применения биогаза во многом схожа с использованием пиролизного газа, то есть ради получения термоэффекта производят его сжигание различными способами.

Следует отметить, что применение биогаза в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания требует его тщательной очистки, это обусловлено тем, что ДВС рассчитаны на характеристики природного газа.

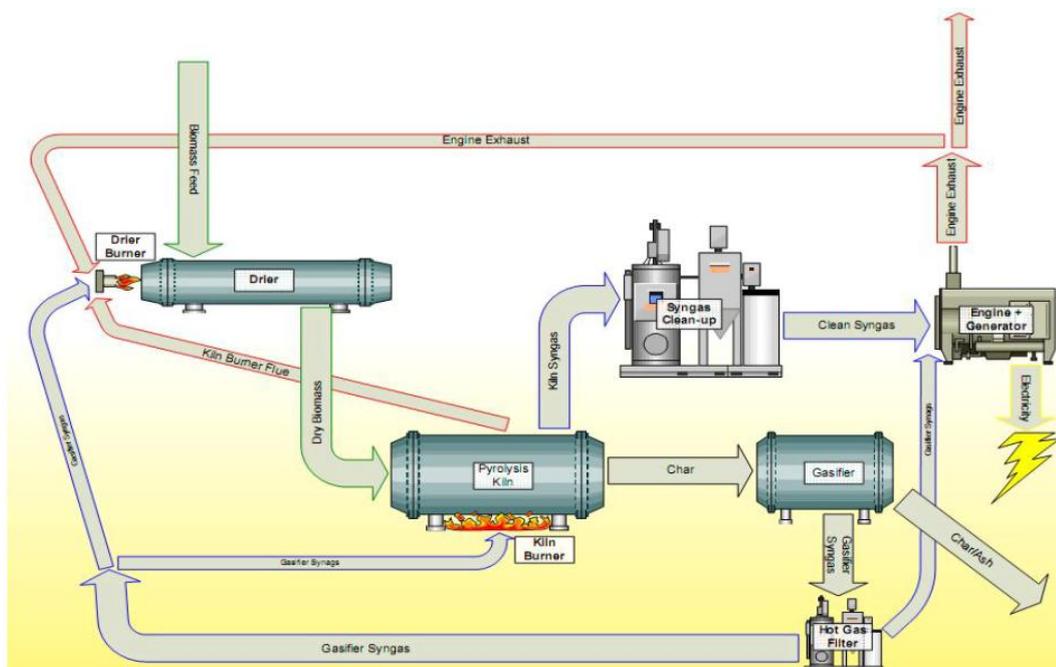


Рисунок 1.9 – Использование биогаза для запуска ДВС

Содержание метана должно составлять не менее 85% азота – 14%. Другим важным фактором является качество биогаза, который должен быть постоянным. Эти строгие условия необходимы, чтобы избежать высоких уровней  $\text{NO}_x$ .

Уже к 2017 году в мире насчитывалось около 4 млн. транспортных средств, ДВС которых работали на биогазе. Основным преимуществом использования биогаза, в качестве топлива – сокращение выбросов углекислого газа, метана и локализация получения энергоносителей, с отсутствием необходимости его импортирования. В таблице 1.3 приведены характеристики различных двигателей при использовании биогаза в качестве топлива. На данный момент среди стран лидеров по освоению биосырья и в частности по использованию продуктов его переработки в качестве топлива можно отметить Швецию, где в одном только Гетеборге зарегистрировано более 4000 автомобилей, работающих на биогазе.

Отдельно следует отметить результаты анализа проведенных в работе [18] исследований показывают положительные эффекты от применения системы твердых оксидных топливных элементов (ТОТЭ) с энергетической

точки зрения, по сравнению с традиционными системами. Преимущества в области производства электроэнергии и низкие затраты на техническое обслуживание позволяют получать более высокие доходы, данные системы в последнее время находят все большее распространение в США и Азии.

Таблица 1.3 – Характеристики ДВС на биогазе

Примечания	Двигатель на бензине по принципу газ-Отто	Двигатель на дизеле по принципу газ-Отто	Двигатель на дизеле Воспламенение от впрыскивания топлива
Цена	Низкая	Очень высокая	Высокая
Электр. КПД	20 – 25%	30 – 35%, от 300 кВт более чем 35%	30 – 40%, одинаковая для всех классов мощности
Срок эксплуатации	Низкий	Средний	Средний
Создаваемый шум	Средний	Сильный	Сильный
Сажа в отработанных газах	Отсутствует	Отсутствует	Присутствует
Техническое обслуживание	Высокое	Небольшое	Высокое
Потребление зажигательного топлива	Нет	Нет	Да
Возможная замена топлива в случае отсутствия биогаза	Сжиженный газ (бензин)	Сжиженный газ	Мазут, дизельное топливо

Причина использования системы ТОТЭ связана со следующими аспектами:

– ДВС работающие на традиционном топливе показывают снижение эффективности выработки электрической энергии, для небольших электрогенераторов (< 100 кВт), КПД составляет ~ 38%, в то время как использование ТОТЭ, является модульной системой и гарантирует постоянную эффективность для небольших электрогенераторов – КПД составляет ~ 53%, то есть данная система обеспечивает большее количество электрической энергии на единицу произведенного биогаза.

– Модули ТОТЭ могут работать в диапазоне модуляции 100 – 50%, что позволяет системе работать с почти стабильной производительностью даже при изменении скорости потока биогаза, что является типичной проблемой на биореакторных установках небольшого размера, где отсутствует хранилище газа.

– ДВС работающие на традиционном топливе, несмотря на развитие технологий, продолжают демонстрировать негативное воздействие, касающееся выбросов в атмосферу, что требует установки систем дожигания, для снижения количества  $\text{NO}_x$  и органических соединений. Электрохимические системы, такие как ТОТЭ, производят почти нулевые выбросы.

– Сдерживающими факторами крупномасштабного внедрения систем ТОТЭ на международный рынок, являются инвестиционные затраты и повышенная требовательность к загрязнителям вырабатываемого биогаза. Первое должно было бы отчасти решить национальным финансированием для выработки «чистой» энергии, с увеличенным введением таких систем на рынок.

Второй пункт может быть решен детальным проектированием систем очистки и измерением загрязнителей биогаза в реальном времени (онлайн).

Интеграция систем возобновляемых источников энергии с соответствующей технологией играет решающую роль в решении проблемы устойчивого энергоснабжения. В зарубежной литературе [58] приводятся концепции интеграции энергии биомассы и солнечной концентрированной

фотовольтаической (CPV) энергии. В частности, в работе [58] исследованы характеристики применения сырого биогаза для ДВС, с генератором постоянного тока, встроенными в единую гибридную энергетическую систему. Эксперименты проводились при разных скоростях потока топлива и при различных условиях электрического нагружения. Анализ данных проведенных в работе показывает, что по сравнению со сжиженными углеводородными газами (LPG), применение биогаза в качестве топлива для ДВС снижает мощностные характеристики последнего примерно на 32 % из-за его низкой калорийности (таблица 1.4), однако по количеству выбросов выхлопных газов генератора с использованием сырого биогаза наблюдается значительное снижение содержания монооксида углерода и углеводородов (существенных различий в уровнях концентрации оксидов азота в сравнении с LPG не зафиксировано), что подтверждает его экологичность в качестве топлива. Интеграция электрогенератора с питанием от сырого биогаза с системой солнечных электрогенерирующих концентраторов (CPV) может обеспечить устойчивое энергоснабжение в сельской местности.

Таблица 1.4 – Топливные свойства сжиженного нефтяного газа и биогаза

Свойства	Биогаз	LPG
Состав:	метан (CH <sub>4</sub> ) – 54 % двуокись углерода (CO <sub>2</sub> ) – 44 % другие газы – 2 %	пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) – 28 % бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) – 70 % другие газы – 2 %
Относительная плотность при 15 °С (кг/м <sup>3</sup> )	1,12	2,15
Нижнее значение нагрева при 1 атм. и 15 °С (МДж / кг)	17	43,5
Температура воспламенения (°С)	650	450
Скорость пламени (см /с)	25	38,25
Октановое число	130	103 – 105

Основной же трудностью в производстве двигателя, работающего на биогазе, по-прежнему является качество биогаза, которое варьируется в зависимости от региона, что затрудняет переход на стандартную систему подачи топлива в ДВС. Как сообщалось в работах [7], биогаз состоит из различных газов, таких как метан (60 – 70%), CO<sub>2</sub> (30 – 40%), азота (< 1%) и H<sub>2</sub>S (10 – 2000 ppm). Данный состав затрудняет использовать установку двигателя, например, для запуска электрогенератора.

Концентрации примесей (метан, диоксид углерода, вода, сероводород, азот, кислород, аммиак, силоксаны) зависят от состава субстрата, из которого был получен газ. Поэтому, чтобы предотвратить коррозию и механический износ оборудования, требуется его очистка.

Биогаз после выхода из биореактора насыщен водяным паром, этот водяной конденсат в трубопроводах и вызывает коррозию. Вода может быть удалена путем охлаждения, сжатия, абсорбции или адсорбции. Увеличивая давление или уменьшая температуру, вода может быть удалена из биогазов в виде конденсата. Охлаждение может быть достигнуто просто путем захоронения газопровода, оборудованного конденсатной ловушкой в почве. Вода также может быть удалена путем адсорбции с использованием молекулярных сит, SiO<sub>2</sub> или активированного угля. Эти материалы обычно регенерируются нагреванием или уменьшением давления. Другими технологиями удаления воды являются абсорбция в растворах гликолей или использование гигроскопичных солей.

При микробиологическом восстановлении серосодержащих соединений (сульфатов, пептидов, аминокислот) образуется сероводород. Концентрации сероводорода в биогазе могут быть снижены либо путем осаждения в жидкости в варочном котле, либо путем обработки газа, либо в автономном сосуде, либо при удалении диоксида углерода. Добавление ионов Fe<sup>2+</sup> или ионов Fe<sup>3+</sup> в виде FeCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub> или FeSO<sub>4</sub> в варочный котел осаждает почти нерастворимый сульфид железа, который удаляют вместе с дигестатом.

*Подача биогаза в сеть магистрального природного газа.* В 2001 г. согласно директивы ЕС по энергосбережению были внесены правовые

условия, предписывающие открытость общественных магистральных газопроводов для поступления в них биогаза. Тем не менее ввиду существующих ограничений по транспортировке и потреблению биогаза, данная концепция до сих пор не получила широкого внедрения.

В таблице 1.5 [38] приведены качественные свойства биогаза и природного газа. Из таблицы видно, что биогаз должен содержать большой процент метана и низкий сероводорода, чтобы соответствовать свойствам природного газа. Это означает, что очистка и сушка биогаза, является необходимым условием, также должно быть сбалансировано давление с сетью природного газа.

Таблица 1.5 – Требования, предъявляемые к биогазу для подачи его магистральный газопровод

Состав не очищенных газов	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> %	Углеводороды мг/м <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> S мг/м <sup>3</sup>	Фторхлоруглерод
Свалка	40 – 60	20 – 40	Остаток	...300	...400	20 – 1000
Биогазовые установки	60 – 80	20 – 40	Остаток	–	..8000	–
Очистные сооружения	60 – 70	20 – 40	Остаток	...10	..8000	–
Природный газ Н-область	>96	Специальные нормы отсутствуют	O <sub>2</sub> <0,5	Специальные нормы отсутствуют	<5	–
Природный газ L-область	>90	Специальные нормы отсутствуют	O <sub>2</sub> <0,5	Специальные нормы отсутствуют	<5	–

Очистка газа – это первичная фильтрация, после которой сера очищается в специальной установке. Третья фаза (в случае удаления  $\text{CO}_2$ ) – это обезвоживание и доочистка от  $\text{CO}_2$ . Наиболее широкое распространение получили следующие методы очистки от углекислоты и обогащения биогаза метаном [16]:

- Pressure Swing Adsorption;
- мембранное разделение;
- промывка под давлением;
- разжижение газа.

Наиболее распространёнными методами являются Pressure swing adsorption (PSA) и промывка под давлением.

Метод промывки, наиболее используемый в Европе метод очистки биогаза (в Швеции эта технология очищает до 80% биогаза), данный метод основан на различной растворимости  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в воде.

В установке PSA пористое твердое вещество циклически используется для очистки биогазового потока. Для этого применения колонны, заполненные специальным материалом CMS (углеродное молекулярное сито).

Рентабельность процессов очистки биогаза зависит от производительности биогазовых установок, поэтому очистка имеет смысл на реакторах с производительностью не менее 250 м<sup>3</sup>/час и очень редко используется на практике. Первый завод по поставке очищенного биогаза для магистральных газопроводов был открыт в Австрии в 2005 году.

### **1.11 Литературно-патентный поиск по конструктивным особенностям биогазового оборудования для анаэробного сбраживания органических отходов**

Существующее в настоящее время биогазовое оборудование для анаэробного разложения органических отходов сопоставимо по своей конструктивной структуре и включает следующие основные элементы:

- метантенк (реактор для биосырья);
- газгольдер (резервуар сбора выработанного биогаза);

- система подогрева;
- система перемешивания биосырья.

Основные критерии характеризующие различие биогазового оборудования:

- форма и пространственное расположение метантенка;
- способ смешивания биосырья;
- способ нагрева биосырья

Известны различные используемые виды резервуаров метантенков (рисунок 1.10), имеющих свои преимущества и недостатки, тем не менее наиболее распространенный в мире тип резервуара – цилиндрический [35].

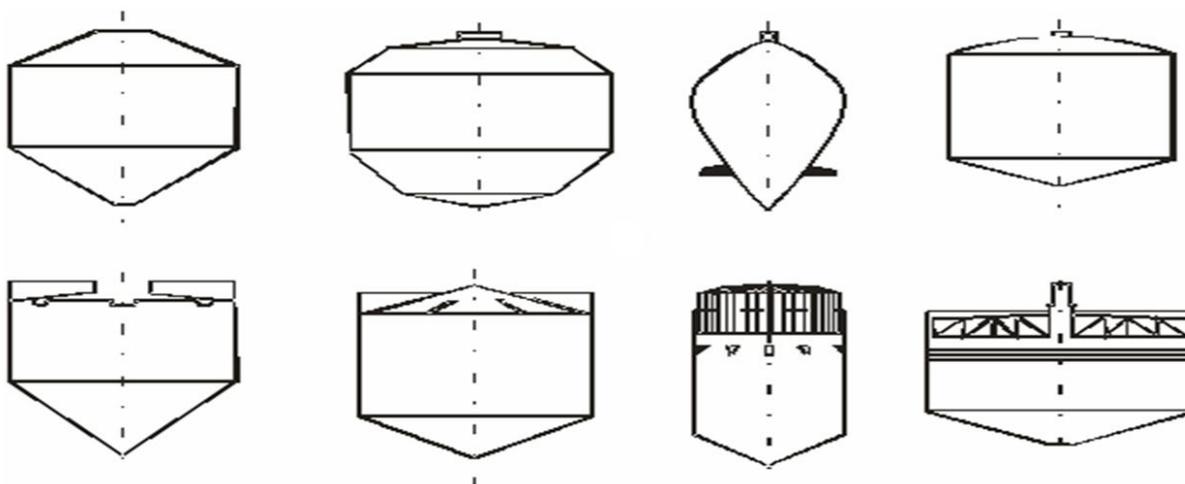


Рисунок 1.10 – Разновидности геометрических форм метантенков

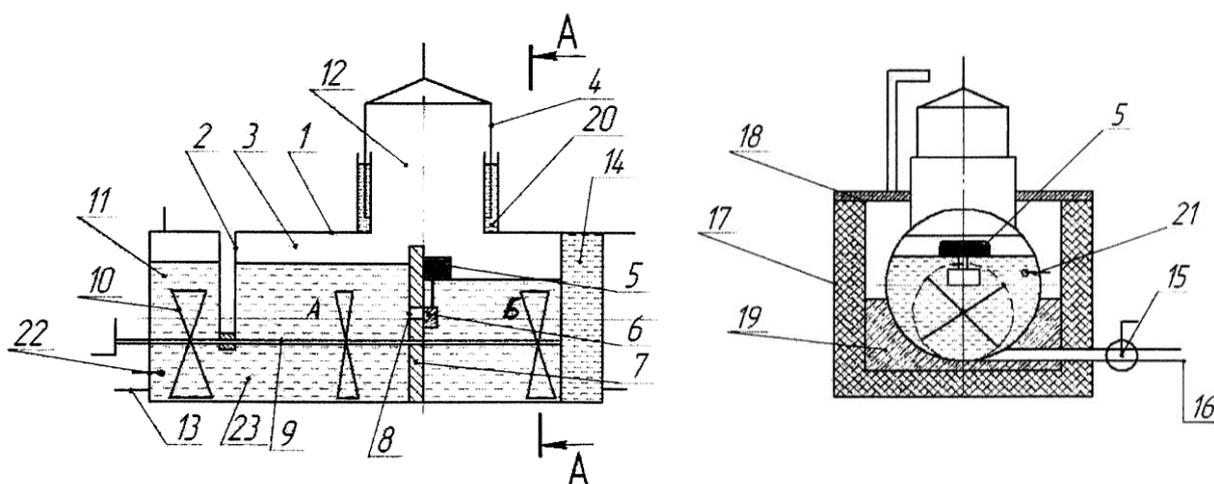
### 1.12 Биогазовая установка горизонтального типа

В ходе выполнения магистерской диссертации был проведен тщательный патентный поиск по существующему оборудованию для анаэробного сбраживания биоотходов, целью которого было выявить передовые конструктивные и технологические решения, отталкиваясь от которых, можно было спроектировать оригинальные узлы для комплексного оборудования по утилизации органических отходов с получением альтернативных источников энергии.

Биогазовая установка анаэробного сбраживания органической биомассы (патент РФ № 2427123) [47], представленная на рисунке 1.11,

состоит из связанных между собой узлов:

- узел загрузки биосырья;
- система подогрева биосырья;
- система выгрузки отработанного дигестата;
- метантенк с системой перемешивания сырья (длина лопастей мешалки больше уровня биомассы);
- газгольдер.



- 1 – корпуса метантенка; 2 – перегородка-сегмент между загрузочной частью и рабочей частью; 3 – узел загрузки биосырья; 4 – газгольдер плавающий; 5 – поплавок; 6 – задвижка; 7 – перегородка, для разделения рабочей секции на части А и Б; 8 – отверстие для переливания жидкого биосырья; 9 – система перемешивания биомассы с лопастями; 10 – лопасти системы перемешивания; 11 – загрузочная секция; 12 – биогаз; 13 – трубопровод (регулирование уровня биомассы); 14 – резервуар с горячей водой; 15 – кран; 16 – слив с емкости Б отработанного дигестата; 17 – хранение биосырья; 18 – крышка с упорами; 19 – подложка метантенка; 20 – уплотнение; 22 – датчик для измерения температуры в емкости А; 23 – биомасса

Рисунок 1.11 – Биогазовая установка горизонтального типа

Система подогрева биосырья связана с метантенком заслонкой и выполнен с системой перемешивания, при этом ось вращения мешалки перпендикулярна оси подогревателя. Узел загрузки биосырья связан с системой подогрева. Узел загрузки биосырья данной установки, также включает измельчитель. Для осуществления всех операций (подогрева биомассы, его перемешивания и измельчения загружаемого сырья)

используются однофазные электродвигатели. Резервуар метантенка выполнен в виде стальной трубчатой емкости, имеющей три рабочих объема:

- загрузочная секция;
- рабочая секция;
- секция выгрузки дигестата.

Рабочие секции между собой разделены перегородками, выполненными в виде сегментов, которые не доходят до дна резервуара. Внутри второй рабочей секции смонтирована система перемешивания биомассы горизонтального типа. Рабочая секция резервуара метантенка разделена на правую и левую части перегородкой с отверстием и задвижкой с поплавком, которая закрывается и открывается автоматически, в зависимости от уровня, биоматериала, находящегося в емкости на момент выгрузки отработанного жидкого дигестата.

В данной установке предусмотрен дополнительный резервуар с горячей водой, расположенный на торцевой стенке правой части рабочей секции, осуществляющий нагрев (54 – 56 °С) биомассы данной рабочей части метантенка, с целью активации термофильных бактерий, и левой части (30 – 42 °С) для жизнедеятельности мезофильных бактерий. Газгольдер, выполненный из немагнитного материала с магнитожидкостным уплотнением, пространственно расположен, так, что является общим для левой и правой частей рабочей секции. Автоматически открывающая/закрывающая отверстия в перегородке задвижка, связана с поплавком тягой.

Порядок работы установки горизонтального типа:

1. Производится загрузка жидкой фракция органических отходов (23) в левую и правую (А, Б) части рабочей секции (3) через узел загрузки биосырья (11) до верхней границы подвижного газгольдера (4).

2. Через трубопроводы(13, 16)производится слив жидкого биосырья до верхнего пространственного положения поплавка (5), который тем самым перекрывает отверстия (8) при помощи задвижки(6). Результатом данных

операций является образование вакуума в газгольдере и рабочих частей метантенка, что приводит к необходимым для анаэробного сбраживания биосырья условиям, с выделением из него биогаза.

3. Производится подача горячей воды (80 – 90 °С) в резервуар (14) и посредством теплопередачи через стальную стенку с высокой теплопроводностью, тепло передается к части Б, а затем через перегородку (7) имеющей низкую теплопроводность – к части А.

4. Посредством вращения системы перемешивания (9, 10), перемешиваемое биосырье выравнивает свою температуру во всем объеме части Б (52 – 54 °С), части А (30 – 42°С). Температура рабочих частей А и Б контролируется при помощи датчиков (21, 22). Продолжительность осуществления процесса сбраживания, не требующая добавления и замены жидкой фракции органических отходов, составляет ~ 10 суток (термофильный режим) и ~ 20 суток (мезофильный режим). Ввиду того, что, подача жидкого биосырья из части А (мезофильный режим) в часть Б (термофильный режим) производится автоматически, посредством отверстия для переливания жидкого биосырья (8) процесс метанообразования происходит непрерывно.

При снижении уровня жидкой биомассы(23), что происходит в следствие выгрузки отработанного дигестата из части Б по трубопроводу (16) и загрузки новой порции биоматериала из части А, поплавков (5) воздействуя через тягу на задвижку (6) производит автоматизацию процесса открытия/закрытия отверстия (8) в перегородке (7).

Герметичность подвижного (плавающего) газгольдера (4) реализована путем применения магнитожидкостного уплотнения(20). Давление, образуемое в результате образования биогаза (12), поднимает газгольдер (4) в верхнее положение, так как он изготовлен из немагнитного материала, смесь магнитожидкостное уплотнение остается на стенках стального корпуса (1) и не пропускает биогаз.

Система автоматического открывания/закрывания отверстия между разделенными на две части рабочей секции метантенка, упрощает

конструкцию биогазовой установки и позволяет использовать его для работы, как в термофильном, так и мезофильном режиме, что приводит к увеличению конечного выхода биогаза.

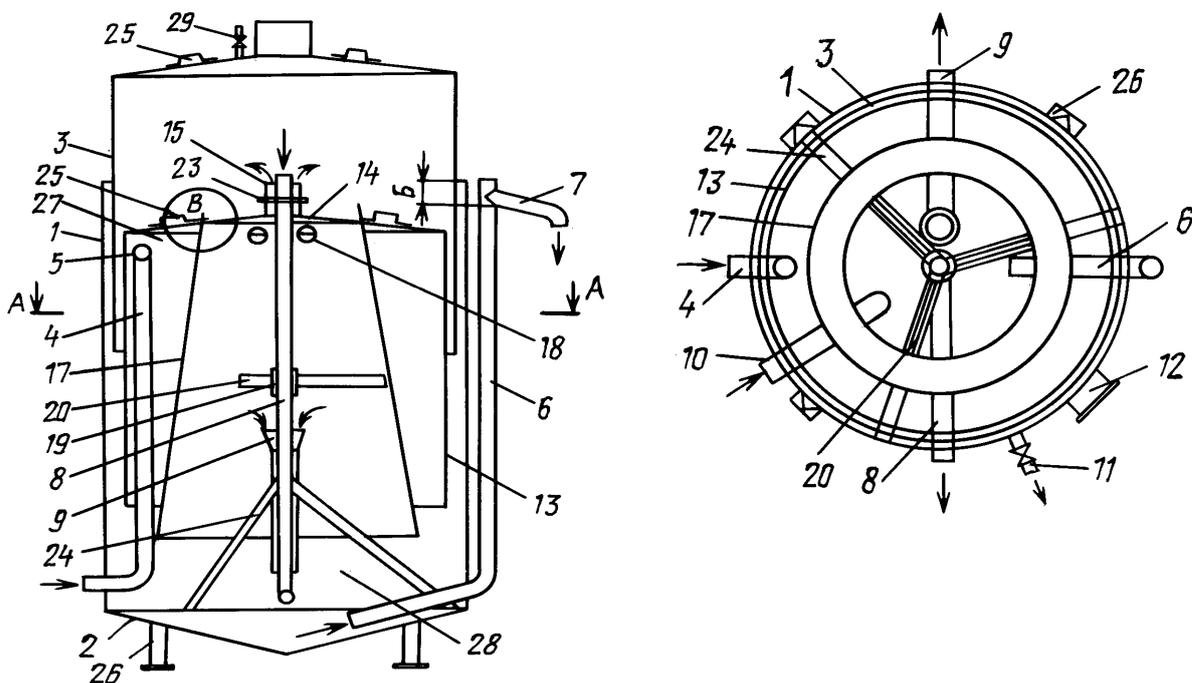
Однако следует отметить, конструкция данного оборудования, не предусматривает автоматическую подачу органической биомассы в реактор.

### 1.13 Биогазовая установка вертикального типа

Биогазовая установка анаэробного сбраживания органической биомассы (патент РФ № 2228583) [48], представленная на рисунке 2.2 спроектирована и предназначена в первую очередь для индивидуального применения в сельском хозяйстве и индивидуальном домостроении.

Установка состоит (рисунок 1.12):

1. мокрый газгольдер с изменяемым объемом;
2. реактор брожения.



1 – корпус газгольдера; 2 – днище; 3 – газовый колпак;  
 4, 6, 8, 9, 10 – патрубки; 5 – тройник; 7 – отвод;  
 11, 29 – вентиль; 12 – люк; 13 – стенка боковая; 14 – купол; 15 – газозборник;  
 16 – штифт; 17 – перегородка; 18 – отверстие; 19 – центрирующая втулка;  
 20, 24 – распорки; 21 – проушины; 22 – паз; 23 – фиксатор; 25 – ручки;  
 26 – опоры; 27 – внешняя камера; 28 – внутренняя камера  
 Рисунок 1.12 – Биогазовая установка вертикального типа

Данная установка предназначена для пофазного, поочередного анаэробного сбраживания, предварительно измельченных и разжиженных органических отходов.

Газгольдер представляет собой корпусное изделие, состоящее из днища и подвижного газового купола.

Реактор биогазовой установки представляет собой конический купол и расположенный над ним газгольдер. К куполу установки коаксиально присоединена разделительная перегородка (снизу), представляющая собой усеченный конус, данная перегородка служит для разделения реактора на две камеры (внутреннюю и внешнюю).

Предварительно обработанная органическая биомасса поступает в метантенк через патрубок с тройником сверху. Отработанный дигестат и биогаз извлекают с помощью патрубков вывода продукции.

Представленная выше (рисунок 1.12) биогазовая установка состоит из корпуса газгольдера (1) с коническим днищем (2) и подвижным газовым колпаком (3), на данном корпусе закреплены патрубки метантенка (патрубок для помещения измельченных органических отходов во внешнюю камеру метантенка (4), имеющий тройник (5), патрубки для выведения отработанного биосырья (6), имеющего отвод (7), патрубка для вывода образованного биогаза (8), установленного вертикально коаксиально (имеющего вид центрирующей трубы), патрубка для приема биомассы на перемешивание и подогрев (9), патрубок возврата биомассы (10) и патрубок для слива биомассы с корпуса (1) с вентилем (11) и люком (12)).

Резервуар метантенка располагается сверху на закрепленных в корпусе (1) патрубках без днища с боковой стенкой (13), куполом (конического типа) (14) с газосборником (15), также снизу к куполу (14) находится присоединенный штифтами (16) концентрическая разделительная перегородка (17), а верхней ее части находятся отверстия (18), внутри перегородки установлена центрирующая втулка (19), закрепленная распорками (20) со стенкой разделительной перегородки (17). Сверху

разделительной перегородки (17) имеются проушины (21) и отверстия для штифтов (16), штифты устанавливаются после ввода проушин (21) в пазы (22), на коническом куполе (14).

Перечисленные выше узлы в виде сборки биогазовой установки закреплены съемным фиксатором (23) на патрубке выхода биогаза (8). Данный патрубок (8) вводится соосно выполненным отверстиям в стенках газосборника (15), а его центрирующее положение фиксируется распорками (24). Подвижный газовый колпак (3), смонтированный в корпус (1) между ним и боковой стенкой метантенка (13) в биомассу, которая в свою очередь выполняет функцию гидрозатвора. Данный колпак (3) снабжен роликами для его свободного перемещения по направляющим установленным на корпусе (1) и ручками (25) для монтажа/демонтажа колпака. Для устойчивого положения биогазовой установки снизу его корпуса приварены опоры (26).

В зависимости от типа и качества биомассы, потребности в максимальном производстве биогаза или максимальной эффективности веществ, содержащихся в сброженной массе (производство удобрений), работа биогазовой установки может осуществляться в широком диапазоне температур сбраживания (от 10 °С до 58 °С). Что определяется спецификацией конкретной биогазовой установки.

В случае анаэробного сбраживания различных органических отходов, первоначально производят их измельчение до частиц  $\approx 20$  мм, затем производится разбавление полученной мелкодисперсной биомассы водой до влажности 92% и, перемешивая вручную доводят биомассу до состояния гомогенной суспензии.

С целью интенсификации старта процесса брожения в предлагаемой установке, перед ее запуском, рекомендуется производить разжижение мелкодисперсной биомассы водой нагретой до 40 – 45 °С, до состояния гомогенной суспензии, а также добавления в разведенную суспензию сброженной отработанной биомассы из другого биореактора, при отсутствии такового можно применять специализированные бактериальные закваски или

свежие экскременты КРС или лошадей в объеме не более 15% от загружаемой в установку биомассы. Первоначальный объем приготовленной суспензии органических отходов должен быть порядка 1,5 объемов загружаемой в установку, что является необходимым условием для ускорения процесса брожения органики в установке. Суть выше сказанного заключается в том, что для нескольких последующих загрузок установки потребуются суспензия в объеме до 10 % (каждая загрузка) емкости установки, а также получения биологически активной отработанной биомассы (осадка), который будет использоваться для разбавления измельченной массы органических отходов вместо воды, что обеспечит поступление сбраживающих бактерий в суспензию биомассы, еще до ее загрузки в метантенк.

Загрузка суспензии в метантенк осуществляется двумя разнонаправленными потоками, через патрубок (4) и его тройник (5) суспензию вводят во внешнюю камеру (27), что создает эффект перемешивания вновь загружаемой биомассы с уже разлагаемой, при этом происходит вытеснение части ранее помещенной в камеру (27) биомассы в внутреннюю камеру (28), подвергшейся воздействию штамма гидролизующих микроорганизмов содержащихся в камере (27) и тем самым обеспечив расщепление сложных органических соединений в первой фазе анаэробного брожения ( $\text{pH} < 7,2$ ) с генерацией плотных жирных кислот и аминокислот. Внутренняя камера (28) служит для выработки биогаза с значительным содержанием метана (метанообразующими бактериями). Сгенерированный в камере (28) биогаз устремляется вверх, где смешивается с обедненным биогазом из камеры (27), поступившим через отверстия (18) в разделительной перегородке (17). В результате смешивания этих газов происходит бурление, препятствующее образованию «корки» в газосборнике (15). Далее газ через верх газосборника (15) поступает в подколпачное пространство подвижного газового колпака (3) и по патрубку выхода биогаза (8) поступает к потребителю.

Поступление биомассы из камеры (27) в камеру (28), производится

одновременно с поступлением обработанной биомассы, из камеры (28) через патрубок (6) и отвод (7) в ведро с сеткой сепарации на жидкий осадок и твердый дигестат (рисунок 1.13), получившийся жидкий осадок отработанной биомассы по объему приблизительно равен объему новой загружаемой в установку суспензии.

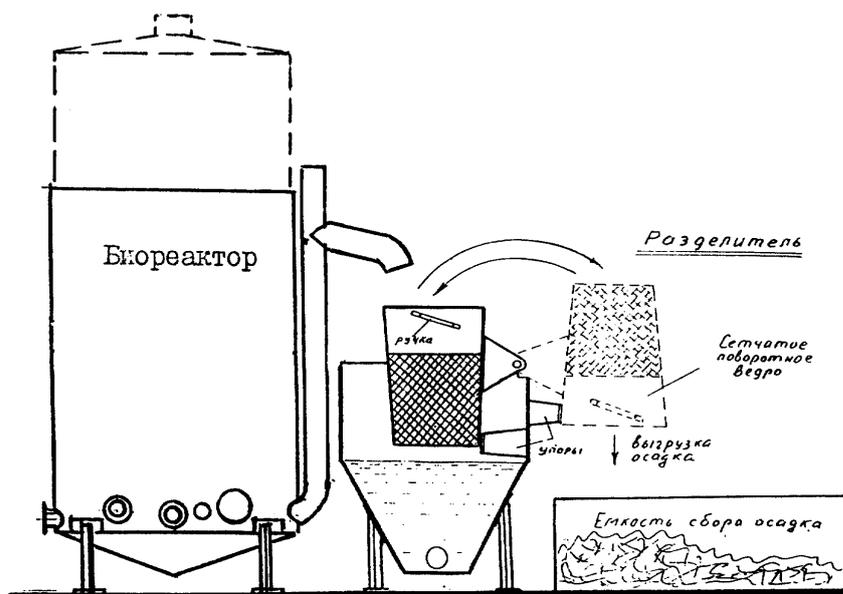


Рисунок 1.13 – Схема выгрузки

Загрузка биомассы через патрубок (4), а также периодическое перемешивание разлагаемой во внутренней камере (28) биомассы, осуществляемое забором по патрубку (9) и возвратом обратно в камеру (28) с под напором по патрубку (10), производится диафрагменным насосом с ножным приводом или компрессором.

Описанная в изобретении биогазовая установка может быть изготовлена в различных типоразмерах с объемом реактора от 1 до 10 м<sup>3</sup>. Биогаз, производимый данной установкой, может быть использован в частном домохозяйстве или в небольших сельскохозяйственных предприятиях для сжигания в бытовых печах систем отопления, проточных и емкостных газовых водонагревателях, а также для выработки электроэнергии на когенерационных установках.

Проанализировав характеристики данной биогазовой установки, можно

отметить ряд существенных ее недостатков.

Во-первых, оборудование сконструировано таким образом, что технологический цикл ее работы представляет собой комбинацию функционально различных анаэробных фаз брожения, так как для осуществления процесса сбраживания, требуется введение в реактор приготовленной гомогенной суспензии органических отходов вместе с общей смесью. Следовательно, происходит замедление работы гидролизующих штаммов бактерий при проведении необходимого выполнения первой фазы анаэробного сбраживания, при которой должно происходить расщепление сложных соединений на более простые с образованием жирных кислот и аминокислот, а также ухудшаются условия для выполнения второй фазы анаэробного брожения – выработке метанообразующими бактериями биогаза, что в итоге приводит к неэффективности использования процессов анаэробного сбраживания.

Во-вторых, существенным недостатком данного оборудования является обособленный вокруг корпуса бродильной камеры круговой водяной резервуар, используемый для гидрозатвора подвижного колпака газгольдера, данная конструкция усложняет, как изготовление установки, так и ее использование, и ремонт.

В-третьих, как и в случае с биогазовой установкой горизонтального типа, рассмотренной в п. 1.12, конструкция данной установки не предусматривает автоматическую подачу органической биомассы в реактор и требует много операций по предварительной подготовке органического сырья.

## **Глава 2 Предложение конструкторско-технологических решений по интенсификации процессов анаэробной деструкции органических отходов**

### **2.1 Интеграция процессов анаэробной деструкции органических отходов для получения альтернативной энергии**

Проведенный и изложенный выше анализ особенностей и проблем, связанных с анаэробным сбраживанием органических отходов, свидетельствуют, что немалая часть органических отходов содержит лигноцеллюлозный материал, который в малой степени подвержен биоконверсии и требует предварительной обработки для облегчения биодеградации богатого лигнином материала [7]. Лигноцеллюлозная биомасса состоит из трех основных полимеров: целлюлозы (35 – 50%), гемицеллюлозы (20 – 30%), которая является полисахаридом, состоящим главным образом из пентоз и гексоз, и лигнина (15 – 25%), который является полимером со сложной структурой и высоким молекулярным весом, состоящим из ароматических спиртов, связанных простыми эфирными связями.

Также серьезным препятствием внедрения данной технологии в России является его относительная низкая энергетическая эффективность при производстве биогаза, так как до 60% производимого биореактором биогаза расходуется на поддержание собственных нужд установки в зимнее время.

Интеграция анаэробных процессов биологического сбраживания и термохимического разложения, такого как пиролиз, предлагает альтернативный подход для возможного получения общей высокой энергетической эффективности [7].

Современная технология быстрого пиролиза перерабатывает лигноцеллюлозную биомассу в отсутствие кислорода и при атмосферном давлении с температурой приблизительно 450 – 550 °С (рисунок 2.1).

Отличительными особенностями быстрого пиролиза являются:

- способность построения непрерывного замкнутого технологического производственного процесса;
- минимальное содержание угарного газа, при практическом отсутствии углекислого газа;
- относительная «чистота» выходных продуктов пиролиза, из-за не высокой интенсивности процесса бертинирования («осмоления»);
- минимальная энергоемкость процесса, по сравнению с другими видами пиролиза.

Основными конечными продуктами процесса быстрого низкотемпературного пиролиза органических отходов, являются: пиролизный газ ~ 20%; пиролитическое масло до 75%; пикарбон (пористый «биоуголь» – твердый остаток, содержащий углерод) порядка 15 – 20%. Конечный выход и свойства продуктов быстрого пиролиза зависят от различных факторов, таких как состав биомассы (основной аспект), содержание влаги, скорости нагрева и время проведения процесса. Поэтому для максимальной окупаемости технологии быстрого пиролиза требуется подготовка исходного сырья:

- измельчения до возможно меньшего эквивалентного диаметра частиц исходного вещества;
- сушка исходного вещества (эндотермия) до минимально возможной относительной влажности ~ 10 – 15%.

Если нивелировать эти недостатки, то себестоимость выходных продуктов быстрого пиролиза становится значительно ниже традиционных, полученных из угля, нефти и природного газа. Полученные при быстром пиролизе жидкие продукты обладают большей в 12 раз энергетической плотностью по сравнению с исходной биомассой и могут более эффективно транспортироваться для дальнейшей концентрации и переработки.

Переработка ТКО, с использованием технологии быстрого пиролиза требует сортировки отходов на родовые виды (древесные, бумажные, металлические, стекло (металл и стекло не пригодны для применения технологии быстрого пиролиза), смесь пищевых и других отходов

жизнедеятельности человека в быту – «месиво»). «Месиво», состоящее из неопределенного состава жидких бытовых отходов, не может служить источником построения окупаемого производства, на базе технологии термохимической переработки. Его можно подвергнуть технологической переработке на установках быстрого пиролиза, только с целью утилизации и снижения антропогенного воздействия свалок захоронения отходов.

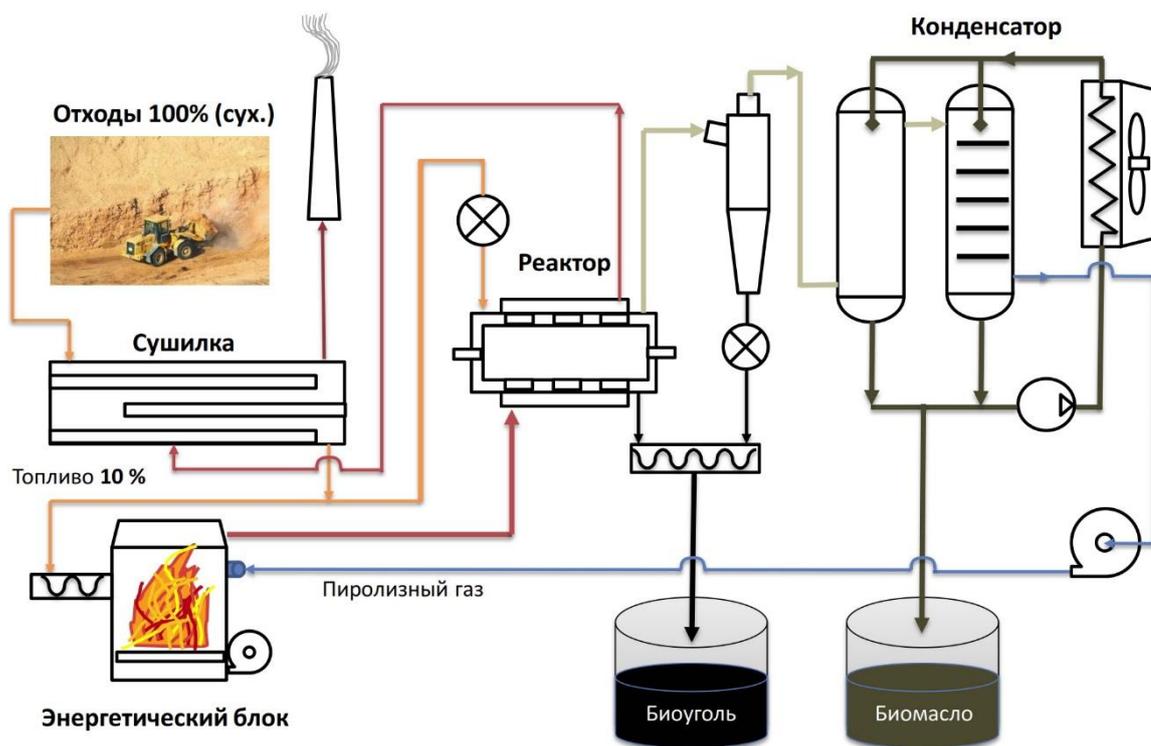


Рисунок 2.1 – Схема технология быстрого пиролиза

Именно при таком подходе обращения с бытовыми отходами жизнедеятельности человека возможно построение самоокупаемых производств.

Поэтому основной идеей данной работы было построение концептуальной схемы, интегрированной анаэробной и термохимической переработки органических ТКО (рисунок 2.2).

Система энергоснабжения биогазовой установки с использованием термохимической переработки органических отходов (пиролиза) работает следующим образом: органические отходы, поступают в сепаратор (1) где делятся на жидкую и твёрдую фракции, затем жидкая фракция («месиво»)

поступает в биореактор, где путём анаэробного сбраживания вырабатывается биогаз, который на ТЭЦ (7) преобразуется в другой вид энергии, а также ценное концентрированное удобрение (8).

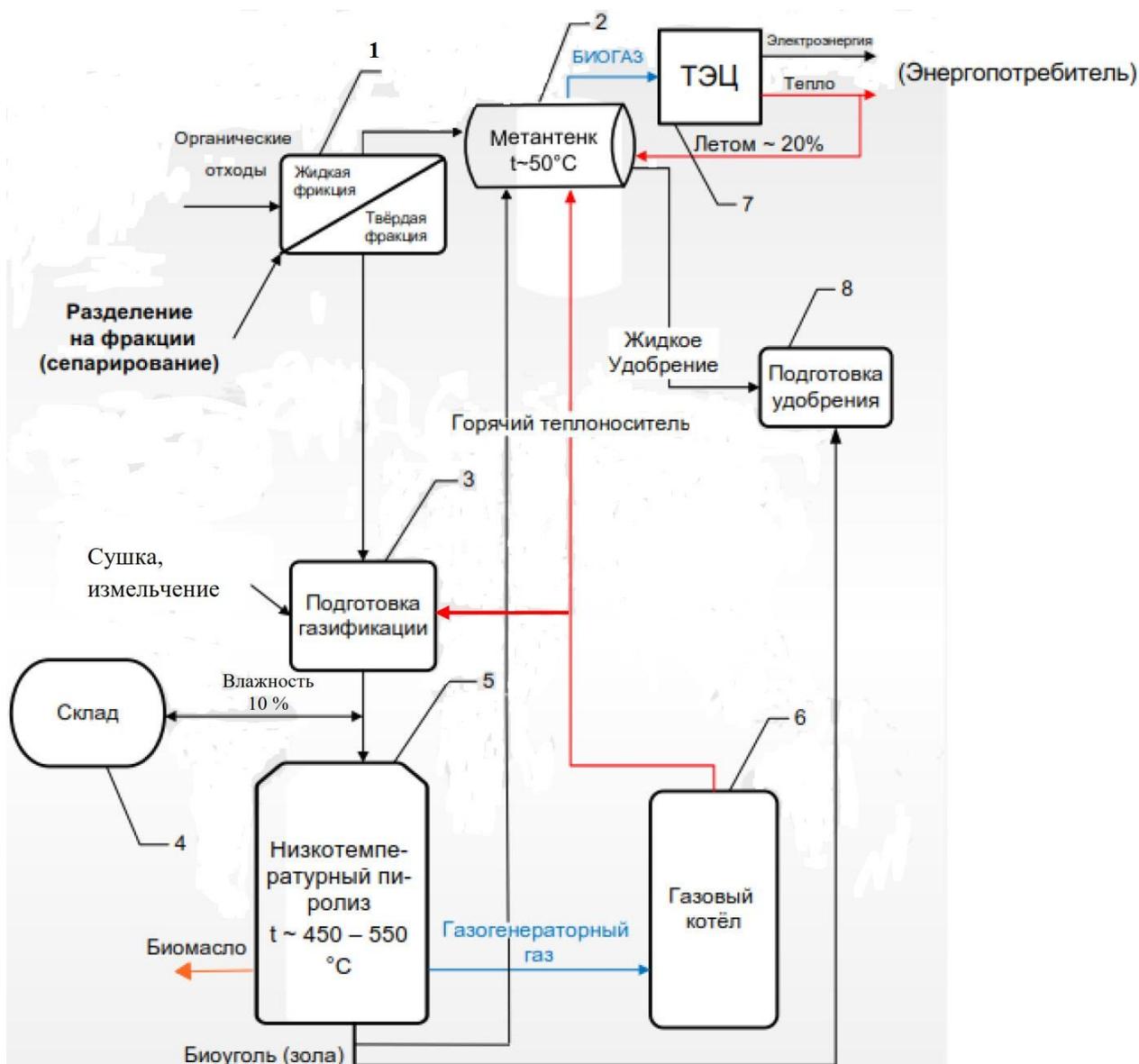


Рисунок 2.2 – Концептуальная схема интеграции анаэробной и термохимической переработки органических отходов

Твёрдая фракция (древесные, бумажные, целлофановые, пластиковые и т. п.), поступает на участок (3), где подвергается сушке ~ 10 – 15% и измельчению до минимально возможной фракции (50 – 100 мм), что является необходимым условием для биосырья подвергаемого переработке методом быстрого пиролиза, высушенная твёрдая фракция поступает на склад (4). Высушенная твёрдая фракция со склада (4) подаётся в газогенерирующую

установку (ГГУ) (5) где под процессом пиролиза преобразуется в пиролизный газ, который сжигается в газовом котле (6). Выделяемая тепловая энергия идёт на подогрев биореактора (2) и участок подготовки газификации (3). Вторичными конечными продуктами ГГУ являются пиролитическое масло и пикарбон,

Пикарбон согласно разработанной схеме, частично добавляется в биореактор анаэробного брожения (2) для интенсификации процесса выработки биометана.

Пикарбон, полученный после процесса низкотемпературного пиролиза (450 – 550 °С) и добавленный в варочный котел биореактора, может увеличить производство биогаза на 5 – 31%, что подтверждают исследования, проведенные в [18, 72]. Из рецензируемой литературы также известно, что добавление его в биореактор, сокращает время адаптации бактерий к питательной среде («лаг-фаза»), минимизирует ингибирование аммиака, действуя как адсорбент и обладает щелочным действием, которое можно использовать для увеличения содержания метана в биогазе.

Оставшийся пикарбон и пиролитическое масло складывается на участке (8), для дальнейшего использования как самостоятельных продуктов, получивших широкое распространение в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве. Известно, что биоголь, может применяться в промышленности, как технический сорбент для очистки: промышленных сточных вод, газов, аэрозолей. Также широкое его применение нашли в способах сбора разлитой нефти и производных продуктов, а также в качестве грунт-рекультиванта для свалок ТКО с целью выведения токсичных соединений из почвы. Пиролитическое масло, представляющее собой водно-органическую смесь с кислой средой и высокой степенью окисленности, используется для получения дизельного топлива, бензина и высококачественного мазута.

По результатам моделирования интеграции процессов быстрого пиролиза и анаэробного сбраживания, проведенным в работе было получено

51% биомасла, 17,6% биологического угля и 15% синтез-газа. Что касается влияния добавления биологического угля на процесс производства и переработки метана, результаты моделирования показывают примерно 7% -ное увеличение эффективности анаэробного сбраживания, предполагая увеличение содержания метана на 5%. Для проведения процесса пиролиза требуется большое количество тепла, так как сухая биомасса 0,219 МВт-ч (1,8 МДж / кг корма), что соответствует результатам, найденным в [5].

Воздушная сушка при 200 °С требует 0,043 МВт-ч / МВт-ч сухой биомассы.

## **2.2 Проектирование комплексного оборудования для анаэробной деструкции органических отходов**

2.2.1 Требуемые параметры к основным узлам разрабатываемого оборудования

### *Бродильная камера*

– Абсолютная герметичность без возможности газообмена и протечек жидкости через стенки.

– Во-вторых, надежная теплоизоляция.

– В-третьих, коррозионная стойкость. Внутреннее пространство камеры должно быть легкодоступным для обслуживания, обязательны простые устройства для загрузки камеры биомассой от продуктов жизнедеятельности человека, животных и сельскохозяйственных отходов.

– Метантенки часто заглубляют в землю, что обеспечивает хорошую их теплоизоляцию и герметизацию. В реакторе обязательно наличие надежной вентиляции.

– Загрузка происходит автоматически путем сброса оборотной воды с органическими отходами.

– Разгрузка сброженной массы осуществляется оригинальным шнековым и тормозным устройствами [29].

### *Нагревательное устройство*

«Подогрев в метантенках для активации процесса брожения осуществляется с помощью теплообменников, через которые пропускают горячую воду. Температура воды в теплообменнике не должна превышать 60 °С» [29].

### *Приспособление для перемешивания и разгрузки*

Для эффективной работы метантенка в нем предусмотрено перемешивающее биомассу устройство, которое также служит для предотвращения коркообразования на внутренней поверхности реактора. Конструкция мешалки оригинальна и представляет собой полый вал, с билами и шнеково-тормозящим устройством.

### *Газгольдер*

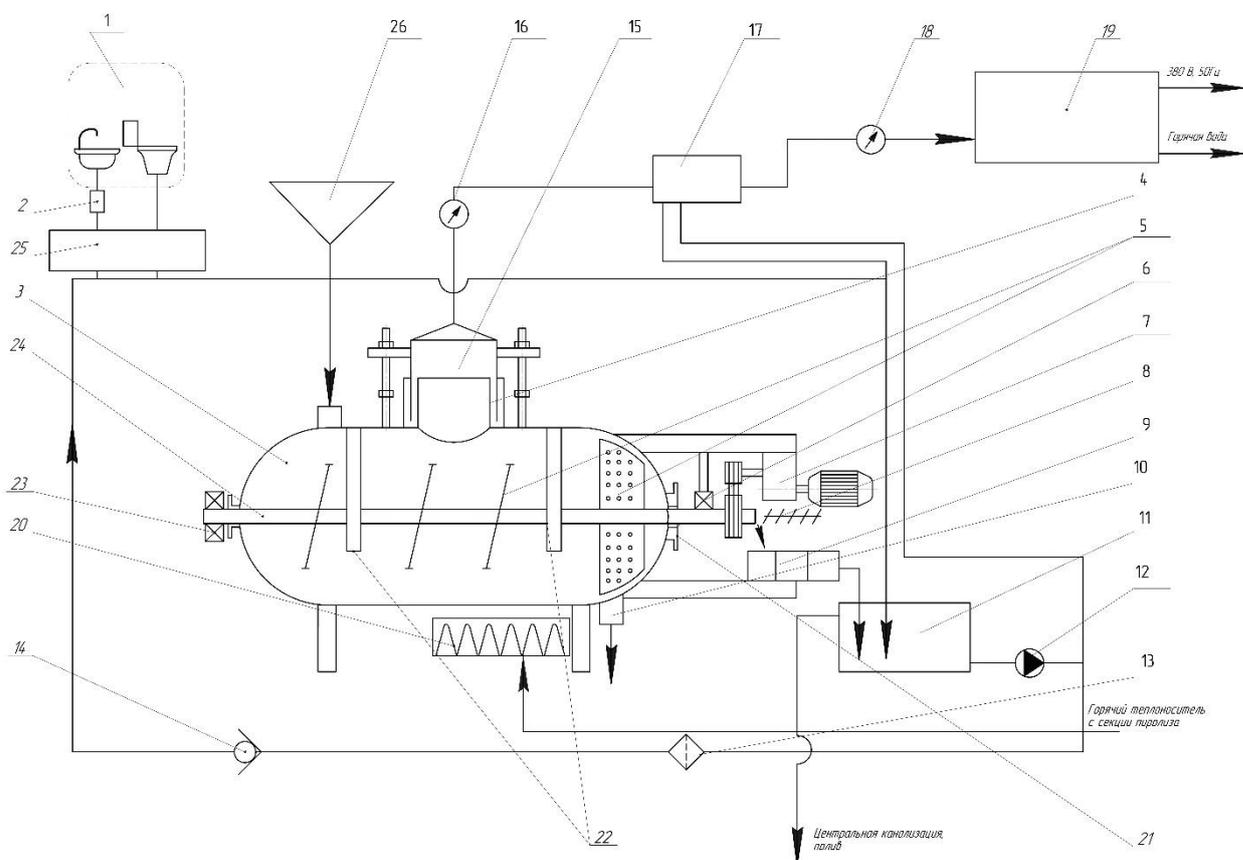
Этот аппарат выполнен в виде надстройки на бродильную камеру. Представляет собой цилиндрическую, куполообразную емкость из антимагнитного сплава, с магнитожидкостным уплотнением (жидкое масло с взвесью мелкодисперстного порошка из магнитного материала) между резервуаром реактора, оснащенным специализированным оборудованием, предназначенный для сбора образовавшегося в результате брожения биогаза и его подачи на скруббер отделения сероводорода и диоксида углерода. Устройство монтируется подземным способом.

## 2.2.2 Назначение и устройство основных узлов секции процесса анаэробного сбраживания

На рисунке 2.3 представлена спроектированная в данной работе замкнутая схема секции анаэробного сбраживания жидкой фракции органических отходов, работающая по замкнутой схеме и интегрированная в общую концептуальную схему (см. рисунок 2.2).

Корпус (рисунок 2.3, поз. 3) – представляет собой стальной резервуар диаметром 1500 мм, длиной 4600 мм и объемом 6 м<sup>3</sup>, с толщиной стенки 30 мм (рисунок 2.4). В верхней части имеется отверстие диаметром 500 мм., предназначенное для установки газгольдера (рисунок 2.3, поз. 15). По осевой

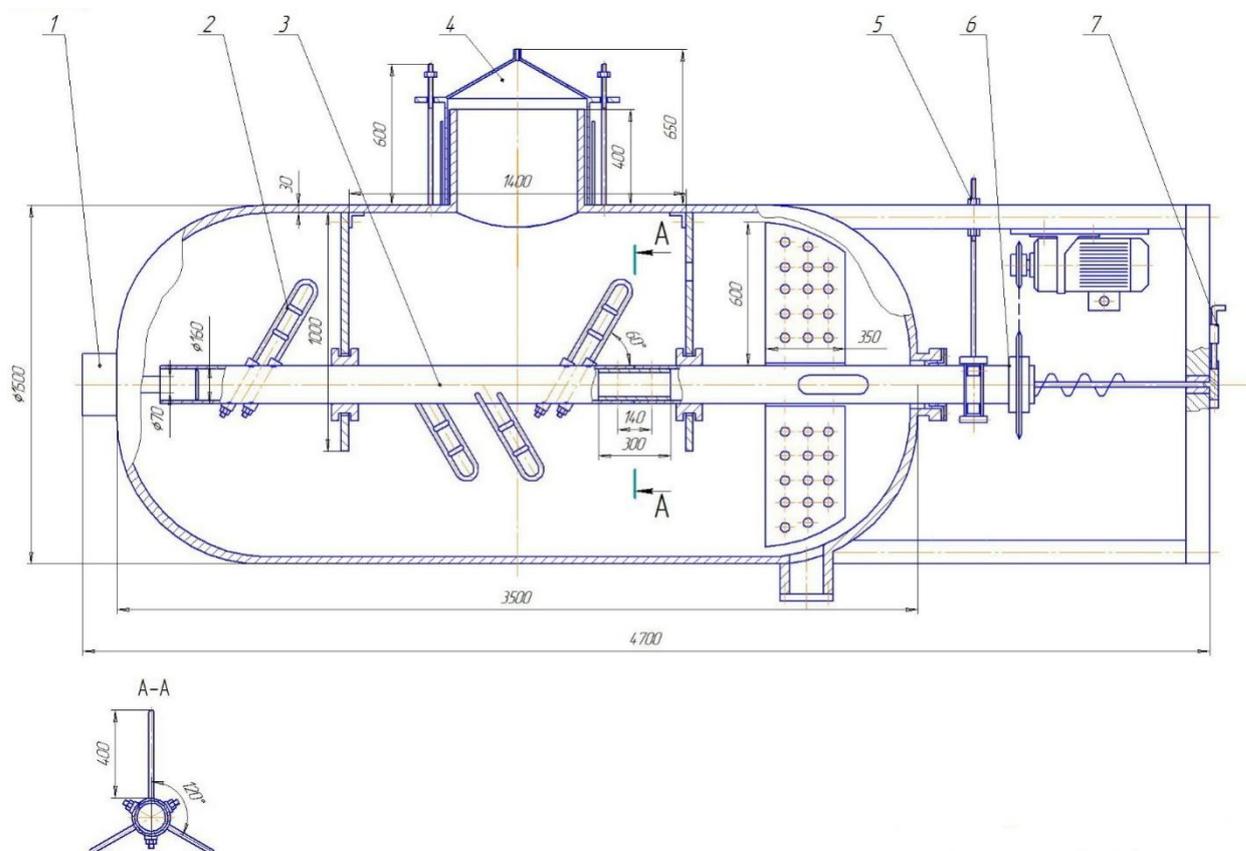
линии имеется отверстие диаметром 120 мм и 300 мм для установки подшипниковых и сальниковых (рисунок 2.3, поз. 21) узлов и крепления вала.



1 – обратная вода; 2 – шредер для измельчения биоотходов; 3 – биогазовая установка; 4 – гидрозатвор; 5 – била; 6 – роликовая опора; 7 – мотор-редуктор; 8 – шнек для удаления отходов; 9 – фильтр грубой очистки; 10 – технологическое отверстие для чистки; 11 – накопительный резервуар; 12 – насос; 13 – дисковый фильтр; 14 – обратный клапан; 15 – газгольдер; 16 – манометр; 17 – скруббер отделения  $\text{CO}_2$  и сероводорода; 18 – газовый редуктор; 19 – миниТЭЦ; 20 – система подогрева 2-го и 3-го отделения; 21 – сальниковый узел; 22 – дополнительные опоры; 23 – подшипниковый узел; 24 – вал центральный; 25 – флотационно-фильтрационная установка; 26 – жидкие органические отходы  
 Рисунок 2.3 – Компоновочная схема секции процесса анаэробного сбраживания

Привод (рисунок 2.3, поз. 7) – предназначен для вращения вала (рисунок 2.3, поз. 24) и представляет собой мотор редуктор ЗМП-40 и цепную передачу (рисунок 2.3, поз. 7), который предает вращение валу, мешалке. Мощность привода и цепная передача выбирались исходя из

объема заполнения реактора субстратом, учитывая жидкофазное состояние субстрата. Работа привода дискретна в течении 14 суток включается 2 – 3 раза (во время загрузки) и в период разгрузки в течении 20 минут.



1 – узел подшипниковый; 2 – било; 3 – вал центральный; 4 – газгольдер;  
5 – опорные ролики; 6 – привод; 7 – фиксатор

Рисунок 2.4 – Биореактор собственной конструкции

Подшипниковый узел (рисунок 2.3, поз. 23) – представляет собой вваренный стакан в корпус, систему уплотнений, роликовый подшипник, закрепленный хвостовой гайкой и шайбой гровера. Подшипник вставляется в корпус подшипника и закрывается фланцем. Сальниковый узел (рисунок 2.3, поз. 21) – представляет собой набивку по периметру вала и системой уплотнения.

Правая опора – представляет собой систему устройств: сальниковый узел (рисунок 2.3, поз. 21) с уплотняющими втулками, подвесную роликовую систему (рисунок 2.3, поз. 6) с упорными роликами, регулируемые по высоте.

Вал (рисунок 2.3, поз. 24) – представляет собой трубу диаметром 120 мм по всей длине метантенка опирающийся на опоры (рисунок 2.3, поз. 21, 23) с дополнительными опорами с бронзовыми втулками (рисунок 2.3, поз. 22). В третьем отсеке метантенка на валу имеются два отверстия, предназначенные для выгрузки отработанного субстрата при помощи шнека.

Била (рисунок 2.3, поз. 2) – предназначенные для перемешивания субстрата и представляют собой изогнутые V-образные пруты, расположенные под углом 30 градусов к валу с резьбовым креплением. Заслуживают внимания била расположенные в третьей части метантенка, представляющие собой плоские черпаки с технологическими отверстиями, которые при вращении вала забрасывают отработанный субстрат в специальное отверстие полого вала.

Система выгрузки отработанного субстрата (дигестата) – представляет собой оригинальное решение, полый вал, плоские била с отверстиями и наличие шнека (рисунок 2.3, поз. 8) без привода внутри полого вала с системой торможения.

Газгольдер (рисунок 2.3, поз. 15) – представляет собой герметичный колпак, вставляемый в отверстие в верхней части метантенка с системой маслянного затвора.

Система транспортировки отходов – представляет собой прямоточную трубу между источниками биоотходов и заливным отверстием метантенка. Данная система предложена впервые, транспортировка осуществляется оборотной водой. Приводимый в движение насосом (рисунок 2.3, поз. 12) – серийного производства.

Измельчитель пищевых отходов (рисунок 2.3, поз. 2) – применяется серийного производства.

Система фильтрации (рисунок 2.3, поз. 13), для фильтрации и удаления запаха оборотной воды – серийного производства.

Обратный клапан (рисунок 2.3, поз. 14) – не допускает обратной циркуляции оборотной воды.

Накопитель биогаза (рисунок 2.3, поз. 17) – предназначен для сбора производимого биогаза с системой отделения  $\text{CO}_2$  и сероводорода.

Система контроля давления газа (рисунок 2.3, поз. 18) – осуществляется серийным газовым редуктором. При превышении давления газа более 1 атмосферы.

МиниТЭЦ (рисунок 2.3, поз. 19) представляет собой когенератор (газопоршневую электростанцию) с системой утилизации тепла.

Происходит выработка энергии:

- электрической (переменный 3-х фазный ток с частотой 50 Гц);
- тепловой (горячая вода).

Расчетный общий КПД станции может достигать 100%, за счет высокой (до 50 °С) температуры оборотной воды.

Подогреватель биомассы биогазовой установки (рисунок 2.3, поз. 20).

На рисунках 2.5 – 2.11 представлена детальная проработка отдельных узлов спроектированного в работе биореактора.

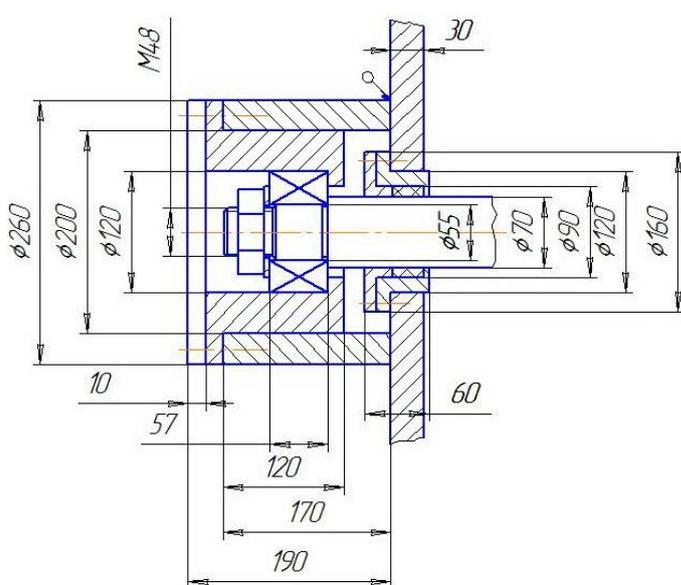


Рисунок 2.5 – Узел подшипниковый

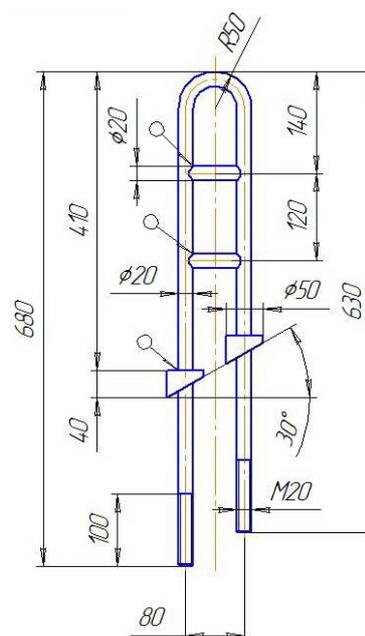


Рисунок 2.6 – Било

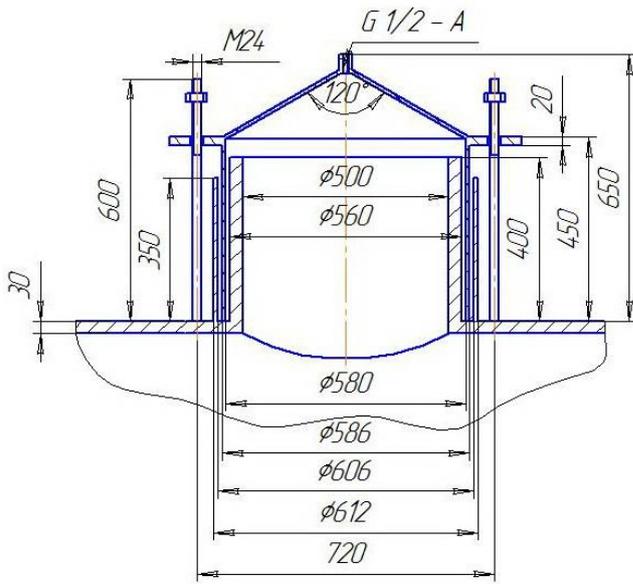


Рисунок 2.7 – Газгольдер

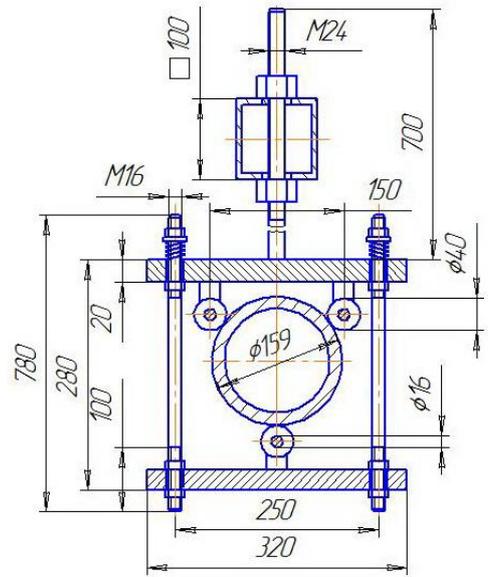


Рисунок 2.8 – Опорные ролики

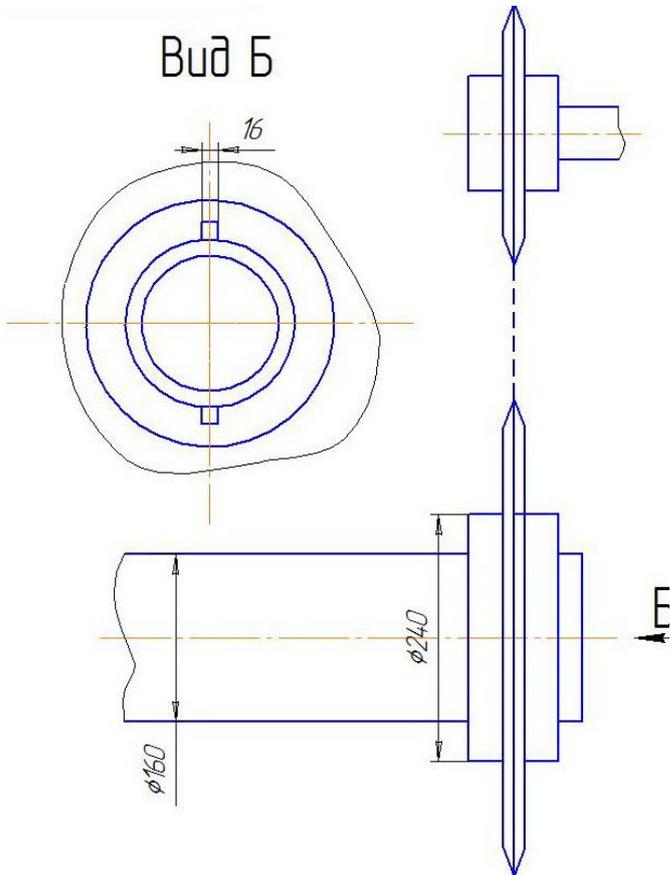


Рисунок 2.9 – Привод

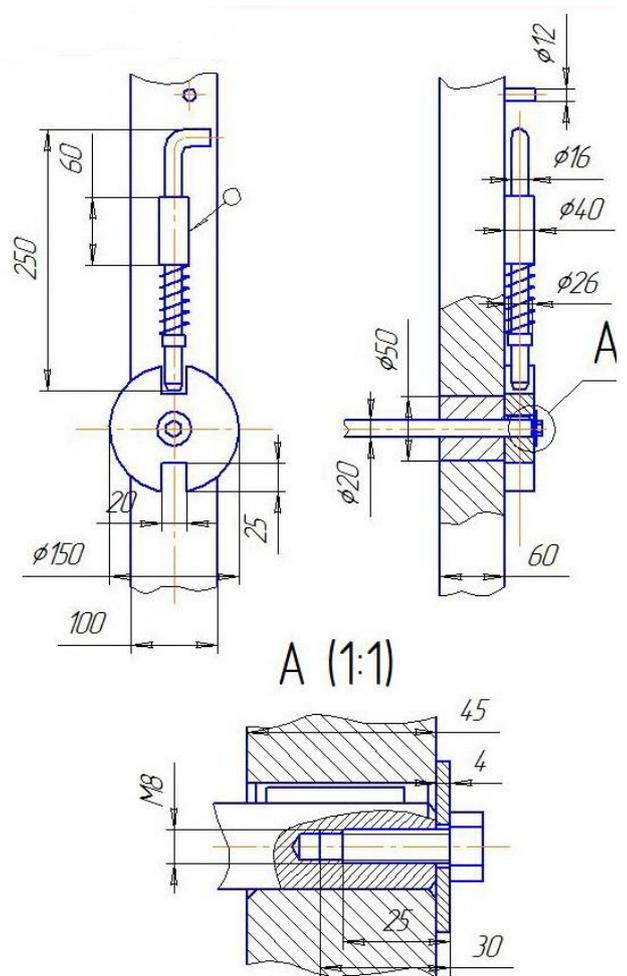


Рисунок 2.10 – Фиксатор

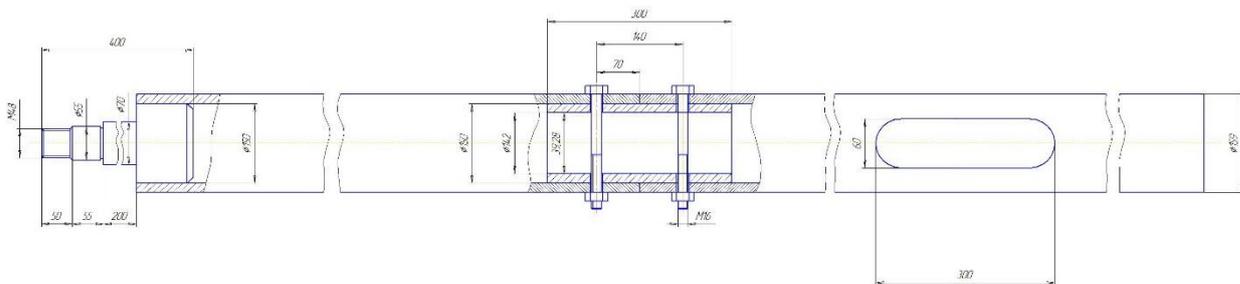


Рисунок 2.11 – Вал центральный

### 2.2.3 Принцип работы основных узлов секции процесса анаэробного сбраживания

Согласно данной схеме, жидкие органические отходы («месиво»), после процесса сортировки (сепарации), поступают в первый отсек биореактора (рисунок 2.3, поз. 26), куда также, по системе транспортировки поступают продукты жизнедеятельности человека из источника (оборотная вода – рисунок 2.3, поз. 1), при необходимости перерабатывается измельчителем (рисунок 2.3, поз. 2). Посредством флотационно-фильтрационной установки (рисунок 2.3, поз. 25) производится снижение до допустимых параметров содержание концентрация мыла, ПАВ, антибиотиков, лишняя оборотная вода сбрасывается по замкнутой системе в накопительный резервуар (рисунок 2.3, поз. 11), процесс накопления отходов происходит автоматически. В данном отсеке брожение не происходит.

При запуске спроектированного в работе оригинального биореактора (поточного типа) (рисунок 2.4) загрузка происходит полностью всего объема реактора, затем вода сливается на 2/3 биореактора для образования вакуума и сбора биогаза. Такой уровень поддерживается в течении всей работы. Второй и третий отсек биореактора имеет дополнительные подогрев до 35 – 60 °С (в зависимости от применяемого процесса) теплоносителем из секции пиролиза (рисунок 2.3, поз. 20), для активации процесса брожения. Объем выделившегося газа контролируется манометром (рисунок 2.3, поз. 16) идет к потребителю через стриппер отделения CO<sub>2</sub> и сероводорода (рисунок 2.3, поз. 17). Перемешивание субстрата осуществляется билами (рисунок 2.3, поз.

5) по мере его накопления. Выгрузка отработанного субстрата осуществляется шнеком (рисунок 2.3, поз. 8). Обратная вода, приводящая в движение насосом (рисунок 2.3, поз. 12) фильтруется (рисунок 2.3, поз. 9,13). Избыточная транспортировочная обратная вода отправляется на автополив и центральную канализацию. Выработанный биометанол очищенный от CO<sub>2</sub> и сероводорода поступает на миниТЭЦ (рисунок 2.3, поз. 19) для преобразования в тепло- и электроэнергию.

#### 2.2.4 Серийное оборудование и компоненты комплексного оборудования для анаэробной деструкции органических отходов

##### *Универсальная установка низкотемпературного пиролиза «Т-ПУ1»*

При анализе существующего на отечественном рынке оборудования для термохимического разложения твердой фракции органических и ТКО, с целью его интеграции с оригинальной спроектированной секцией анаэробного сбраживания была выбрана универсальная модульная установка «Т-ПУ1», производства компании «Пиролиз-Экопром», г. Нижний Новгород (рисунок 2.12, таблица 2.1).

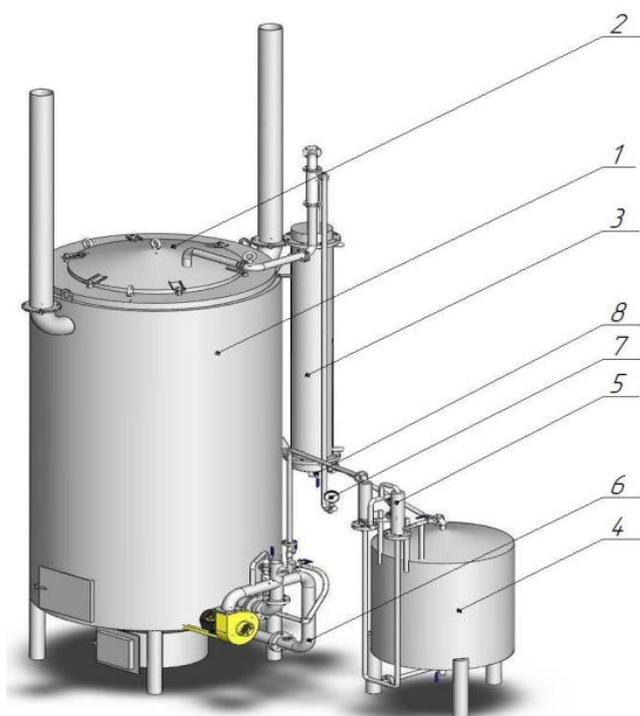
Таблица 2.1 – Характеристики и параметры установки анаэробного быстрого пиролиза «Т-ПУ1»

Наименование показателя	Значение
Количество ретортных печей, шт.	1
Количество реторт, шт.	1*
Внутренний объем загрузочной камеры, м <sup>3</sup>	2,58
Установленная мощность электропитания, кВт/ч	1,1
Номинальное напряжение питания, В	380
Номинальная частота тока, Гц	50

Продолжение таблицы 2.1

Наименование показателя	Значение
Масса комплекта установки, брутто, кг	5400
Масса реторты с крышкой, кг	850
Размер пиролизной печи без труб (ВхШхД), м	2,6x2,6x1,9
Размеры монтажной площадки (ВхШхД), м	4,6x4x5
Средняя производительность в сутки (зависит от загрузки и вида отходов), м <sup>3</sup>	5 – 7

\* Для обеспечения непрерывной круглосуточной работы рекомендуется увеличить количество реторт до 2 – 3 шт (в зависимости от вида перерабатываемого сырья и продолжительности цикла пиролиза).



1 – ретортная печь; 2 – реторта;  
 3 – холодильник; 4 – сборник;  
 5 – сепаратор; 6 – система наддува;  
 7 – манометр;  
 8 – кран шаровой

Рисунок 2.12 – Универсальная установка низкотемпературного пиролиза

«Т-ПУ1»

Данная установка при невысокой стоимости, обладает рядом преимуществ:

- Один оператор и один подсобный рабочий могут обслуживать работу 3 – 4 установок.

- При необходимости увеличения (большей) производительности в технологическую линию ставятся несколько установок «Т-ПУ1».

- Оборудование мало чувствительно к типу сырья и способно перерабатывать несортированные не хлорсодержащие твердые, жидкие и пастообразные отходы, в том числе: нефтешламы, битумы, отработанные масла, бумажную пульпу, смешанные пластики и измельченные остатки автомобилей, полимеры, каучуки, электронную технику, резинотехнические изделия и автопокрышки, канализационный ил, отходы деревообработки, медицинские и химические углеродосодержащие отходы 2 – 5 класса опасности, и т.п.

- Санитарная-защитная зона, составляет 100 метров.

- Установка потребляют около 1 кВт энергии и обеспечивают себя необходимой для работы энергией (требуется только для пуска), в то время как избыток генерируемого пара и/или электричества поставляется внешнему потребителю. Если две пиролизные установки работают вместе (в противофазе), то излишки газа в одной установке используются для запуска процесса пиролиза во второй печи, что минимизирует факельное сжигание излишков газа и стартовый разогрев печи топливом.

- В установках «Т-ПУ1», в отличие от других аналогичных пиролизных установок, разработан и установлен модуль оборудования – «Отсекатель воды», который значительно снижает «закоксовывание» труб в системе охлаждения. Вместо ручной чистки, магистрали установок «Т-ПУ1» можно легко чистить продувкой паром от парогенератора.

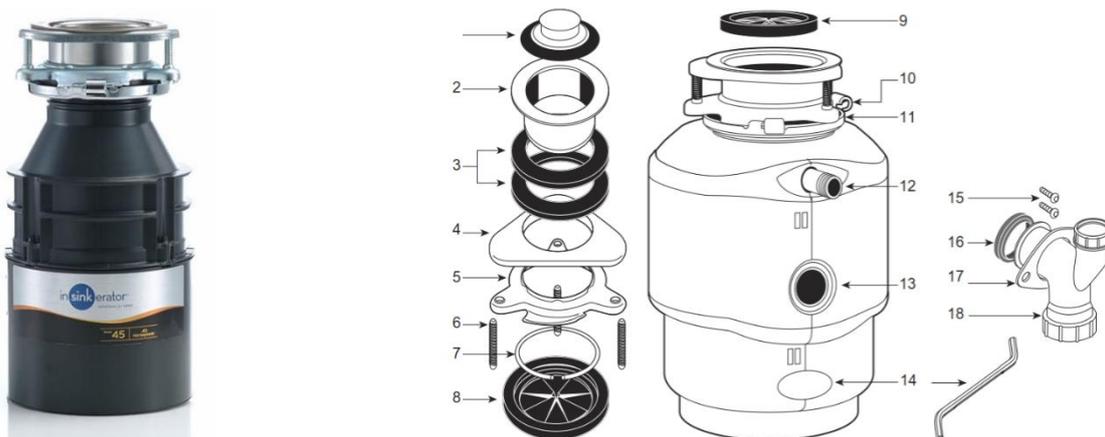
#### *Шредер для измельчения биоотходов с кухни Insinkerator 45*

Шредер для измельчения пищевых отходов In Sink Erator 45 (рисунок 2.13) предназначен для установки в мойку любого типа с большим (89 – 90

мм согласно международным стандартам 3 1/2 дюйма) отверстием для слива. Также возможна установка в мойку с отверстием диаметром 50 мм (если мойка изготовлена из нержавеющей стали). При этом необходимо провести развальцовку сливного отверстия.

*Основные характеристики:*

- напряжение питания: 220 – 240 В, 50 Гц;
- мощность – 0,5 л.с;
- потребляемая мощность – не более 450 Вт;
- двигатель индукционного типа «Dura-Drive»;
- автоматическая защита от перегрузок;
- габаритные размеры: высота – 318 мм, диаметр: 159 мм, Вес: 7015 гр.;
- тип загрузки пищевых отходов – непрерывная загрузка.



- 1 – блокиратор; 2 – фланец раковины; 3 – резиновые прокладки (2);  
4 – уплотнитель; 5 – крепежное кольцо; 6 – шурупы (3);  
7 – защелкивающееся кольцо; 8 – съемный блокиратор

Рисунок 2.13– Шредер для измельчения биоотходов Insinkerator 45

*Насос поверхностный PedrolloPkm 60*

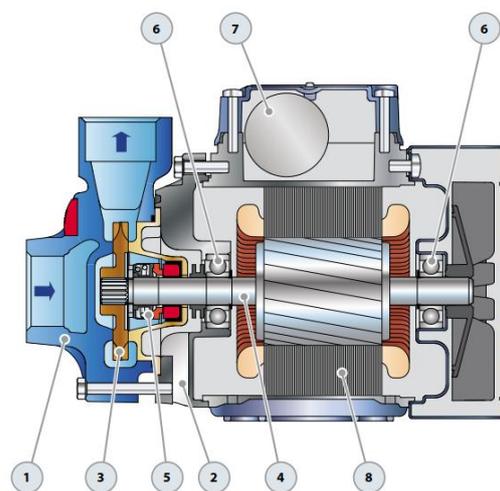
Предназначен для перекачки воды с небольшим количеством абразивных частиц и химически неагрессивных жидкостей к материалам, из которых сделан насос (рисунок 2.14).

Благодаря их надежности, простоте в эксплуатации и экономичности, эти насосы нашли свое применение, прежде всего в быту, в частности, для

подачи воды совместно с небольшими резервуарами автоклавами для орошения огородов и садов. Основные технические характеристики представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики насоса PedrolloPkm 60

Напряжение (В):	220
Мощность (Вт):	370
Производительность (л/мин):	40
Высота подъема (м):	40
Присоединительный размер	1
Допустимая температура жидкости (С°):	от +1 до +60
Манометрическая глубина всасывания (м):	7
Материал корпуса:	чугун
Материал крыльчатки:	латунь
Механические примеси (г/м³):	40
Допустимый диаметр твердых частиц (мм):	1
Вес (кг):	5



1 – корпус насоса; 2 – крышка двигателя; 3 – рабочее колесо; 4 – ведущий вал; 5 – Механическое уплотнение; 6 – подшипники; 7 – конденсатор; 8 – электродвигатель

Рисунок 2.14– Насос поверхностный PedrolloPkm 60

### Мотор-редуктор ЗМП-40

Для вращения вала выбираем мотор-редуктор ЗМП-40-56-1,5 (рисунок 2.15) – планетарный, предназначен для снижения частоты вращения и передачи крутящего момента на вал биогазовой установки. Основные технические характеристики мотор-редуктора приведены в таблице 2.3.

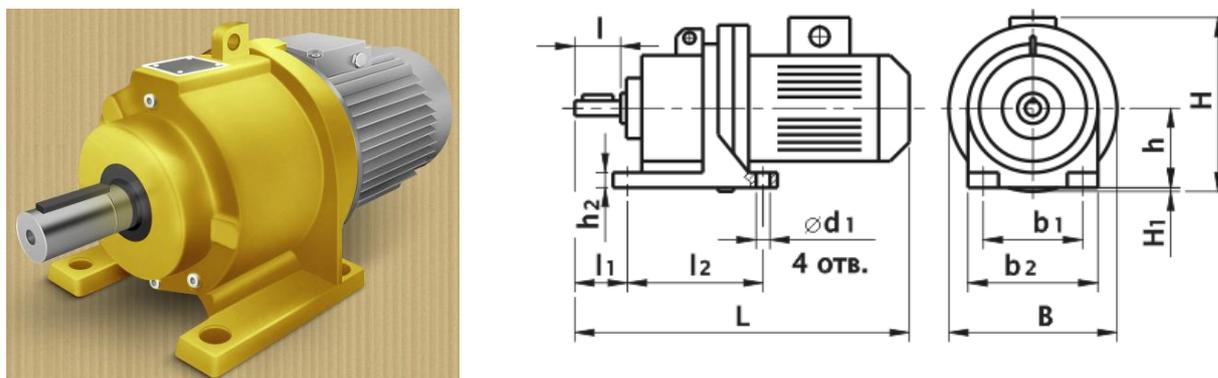


Рисунок 2.15 – Мотор-редуктор ЗМП-40-56-1,5

Таблица 2.3 – Технические характеристики выбираемого мотор-редуктора

Наименование мотор-редуктора	Номинальная частота вращения	Номинальный крутящий момент на валу	Передачное отношение	Масса, кг не более	Двигатель	
					Тип	Мощность, кВт
ЗМП-40-56-1,5	56	248	25,6	40	АИР80В4	1,5

### МиниТЭЦ

В данной работе предлагается к использованию серийно выпускаемая газопоршневая электростанция малой мощности серии G - Выхизготовленная на базе двигателя MAN, отличающаяся компактным размером, высокой экономичностью и КПД (рисунок 2.16). Общий КПД миниТЭЦ, может достигать 100% (макс, температура оборотной воды 50 °С). Основные технические характеристики ТЭЦ представлены в таблице 2.4.

Данная модель применима для индивидуальных частных домохозяйств, ферм, индивидуального предпринимательства и т.п.



Рисунок 2.16 – МиниТЭЦ G-Box 20

Таблица 2.4 – Технические характеристики МиниТЭЦ G-Box 20

Топливо	биометан
Уровень шума	макс. 52,0 dB(A)
Двигатель	4 цилиндр. 4-тактный ДВС (MAN)
Скорость вращения	1500 об/мин
Эмиссии NOx	< ½ TA-Luft
Эмиссии CO	< ½ TA-Luft
Электрическая мощность	10 – 20 кВт
Тепловая мощность	20 – 43 кВт
КПД электр.	32,0% (при 20 кВт)
КПД тепловой	73,0%
Общий КПД	105% (T° обратной воды 50°C )
Соотношение электрической / тепловой энергии	0,46

### *Флотационно-фильтрационная установка ФФУ-1М*

Флотационно-фильтрационная установка ФФУ-1М предназначена для очистки сточных вод автосервисов, ливневых вод гаражей, автостоянок, промышленных предприятий, сточных вод мясокомбинатов, масложировых производств и других типов сточных вод от загрязнений нефтепродуктами, поверхностно-активными веществами (ПАВ), гидроксидов металлов. Устройство может использоваться только в закрытой промышленной среде, где температура воздуха предотвращает замерзание воды в резервуарах и трубах (рисунок 2.17, таблица 2.5).



Рисунок 2.17 – Флотационно-фильтрационная установка ФФУ-1М

Таблица 2.5 – Технические данные и характеристики установки ФФУ-1М

Показатель	Значение
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	0,8 – 1,2
Рабочее давление в сатураторе, МПа	0,54 – 0,58
Время сатурации не менее, мин	2,5
Время флотации, мин	21 – 24
Объем загрузки фильтра, м <sup>3</sup>	0,07

Продолжение таблицы 2.5

Показатель	Значение
Габаритные размеры, мм	
Длина	1180
Ширина	1100
Высота	1440
Масса транспортная, кг не более	245
Масса рабочая, кг не более	630
Питающая сеть, ~ трехфазная, В	380
Установочная мощность, кВт	2,3
Температура очищаемой воды, °С	+5 – +30

### 2.2.5 Подбор консорциума микроорганизмов для анаэробного сбраживания органических коммунально-бытовых отходов

Анаэробный процесс образования биогаза разделяют на четыре последовательных этапа, в процессе протекания данных этапов задействуются более 190 видов бактерий. Физико-химические процессы и особенности протекания данных этапов рассмотрены в п. 1.3.

Первый этап разрушения органических полимеров осуществляется бактериями рода *Butyrivibro*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*. В результате процесса сбраживания происходит образование ацетата, пропионата, сукцината, водорода и CO<sub>2</sub>. Образование различных типов летучих жирных кислот, происходит в следствии сбраживания целлюлозы и гемицеллюлозы под воздействием бактерий, выделяемых из рубца жвачных животных и кишечника свинины [63].

Бактерии рода *Syntrophomonas Desulfovibrio* (ацидогенные микроорганизмы) – используются на второй стадии процесса брожения органического сырья, образуют ацетат, H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>, путем расщепления этилпропионата, бутирата, лактата, пирувата.

Метаногенные штаммы, такие как *Methanothrix*, *Methanosarcine*, *Methanococcus*, *Methanogenium* и *Methanospirillum*, а также бактерии рода

*Acetobacterium woodii*, *Clostridium formicoaceticum*, могут синтезировать ацетат  $\text{CO}_2$  в термофильных условиях.

Метаннообразующие бактерии являются абсолютно анаэробными и разделяются на мезофильные и термофильные.

Метанобразующие и кислотообразующие бактерии в природе встречаются повсеместно, наибольшие численности их популяций и разновидности встречаются в фекалиях животных. Система пищеварения КРС содержит весь необходимый набор бактерий для процессов анаэробного брожения, именно поэтому навоз КРС очень часто применяется в качестве биомассы в реакторах сбраживания.

Для подавляющего большинства метанобразующих бактерий молекулярный водород и  $\text{CO}_2$  служит субстратами для образования метана:



Однако некоторые штаммы образуют метан из окиси углерода:



Существуют виды метаногенных бактерий, субстратом для которых, служит муравьиная кислота:



Метанол, метиламин, диметиламин, триметиламин и ацетат, также может выступать в качестве субстрата, для некоторых видов метанопродуцирующих бактерий:



Для осуществления процесса анаэробного сбраживания жидкой фракции органических отходов (с содержанием влаги 70 – 80%), упрощенный фракционный состав которой, представлен в таблице 2.6, в данной работе предлагается использовать консорциум микроорганизмов, с добавлением бактериальных культур. Усредненные данные о химическом составе субстрата приведены в таблице 2.7.

Морфологические и биохимические характеристики бактериальных групп, содержащихся в консорциуме микроорганизмов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.6– Фракционный состав органических отходов

Компоненты	Состав, %	
	сезон года	
	лето-осень	зима-весна
Картофель и его очистки	25 – 38	38 – 50
Фрукты	20 – 25	18 – 24
Другие овощи	25 – 38	9 – 15
Рыба, рыбные кости	2– 3	2– 3
Мясо, колбасы	3 – 5	3 – 5
Хлеб и хлебобродуки	2	2
Яичная скорлупа	0,5	0,5
Мясные кости	3 – 4	3 – 4
Молочные продукты	0,5	0,5

Таблица 2.7 – Химический состав субстрата

Характеристики	Химический состав, в % общей массы
Влага общая	72 – 85
Сухое вещество	15 – 28
В т. ч.:	
жир	0,4 – 1,6
протеин	1,7 – 4,4
клетчатка	1 – 3
безазотистые экстрактивные вещества	11,4 – 15,5
зола	1,8 – 2,4

Таблица 2.8 –Характеристика бактерий

Род и вид штамма	Характеристика штамма
Bacillus subtilis	Подвижные короткие палочки, края обрублены в виде запятой. На стандартных питательных средах (мясопептонный агар (МПА), питательный агар для культивирования микроорганизмов (СПА)) образует округлые колонии в форме звездочки 1,5 – 2,5 мм в диаметре и более, гладкие, края неровные, непрозрачные. Аэроб. Способен расти в анаэробных условиях в присутствии нитратов в питательной среде [6].
Pseudomonas aeruginosa	Классический представитель рода Pseudomonas. Различные штаммы этих бактерий можно обнаружить всюду: в почве, воде, воздухе, гнойных ранах и сточных водах. По сравнению с другими видами псевдомонад эти формы наиболее интенсивно исследуются бактериологами, изучающими патогенную группу, и фитопатологами. Бактерии Ps. aeruginosa обладают особым разнообразием свойств, но в то же время у них отмечаются характерные общевидовые морфологические и физиологические признаки. Клетки бактерий представляют собой мелкие палочки (1,0 – 1,5 x 0,5 мкм), одиночные или соединенные в пары; имеют один-два, редко три полярно расположенных жгутика, грамотрицательные. Температурный оптимум развития около 37 °С. Являются сильными окислителями углеводов (сахаров, органических кислот, углеводов).

Продолжение таблицы 2.8

Род и вид штамма	Характеристика штамма
Pseudomonasfacilis	Подвижные короткие палочки. На МПА и СПА образует округлые колонии 1,5 – 2,5 мм в диаметре и более, гладкие, края ровные, образует флуоресцирующий пигмент, непрозрачные. Аэроб. Способен расти в анаэробных условиях в присутствии нитратов в питательной среде.
Arthrobacterspecies	Короткие палочки с возрастом укорачиваются до кокков, диаметром 10 мкм, грамположительные. На плотных питательных средах образуют округлые, гладкие блестящие, беловатые колонии. Сапрофит. Гидролизует желатин, крахмал
Clostridiumbutyricum	Подвижные короткие палочки с перитрихияльными жгутиками. Спорообразующие. На МПА и СПА образует округлые колонии в форме звездочки 1,5 – 2,5 мм в диаметре и более, гладкие, края неровные, непрозрачные. Анаэроб. Способен расти в анаэробных условиях в присутствии нитратов в питательной среде. Обладает сахаролитическими и протеолитическими свойствами. Гидролизует желатин. Образует сероводород, и меркаптан, не разрушает мочевины.
Erwiniaamylovora	представляет собой подвижные (при помощи жгутиков) палочки, расположенные одиночно или короткими цепочками. Размер 0,7 – 0,1 x 0,9 – 1,5 мкм. Спор и капсул не образует. Грамотрицательные аэробы или факультативные анаэробы. Не устойчивы к кислотам. Оптимальная температура для развития 30 °С, погибают при 43,7 °С.

Используемый в работе консорциум микроорганизмов позволит проводить анаэробную деструкцию «жидкой» фракции органических отходов с получением биогаза.

### **Глава 3 Проведение технико-экономической оценки рыночного потенциала при внедрении комплексной технологии анаэробной деструкции органических отходов**

Интенсивный рост потребления, особенно в крупных мегаполисах России, приводит к увеличению производства ТКО. Система управления отходами в России, сфокусированная преимущественно на их захоронение, является неполноценной, данная система приводит к загрязнению атмосферного воздуха, грунтовых вод, отчуждению и непригодности земель ежегодно выделяемых под организацию новых полигонов ТКО. Данные аспекты, в свою очередь существенно снижает качество жизни населения, игнорирует принципы экономического развития и требует радикального улучшения.

К одним из важнейших факторов для Россиян следует в первую очередь отнести постоянный рост тарифов на энергоносители (среднегодовой рост тарифов на центральное газоснабжение составляет порядка 18 – 25%, на электроэнергию 10 – 15%, чему способствует ряд фундаментальных долгосрочных проблем, как в российском газовом секторе, так и других социально-экономических и правовых сферах Российской Федерации:

1. Тотальная коррупция во всех эшелонах действующей власти.
2. Монополизация и концентрация активов, энерго-добывающих и генерирующих мощностей в руках олигархии.
3. Лимитирующая доля зарубежных активов (до 50%) в национальных энерго-добывающих и генерирующих предприятиях.
4. Сокращение газодобычи российскими компаниями на 25 млрд. м<sup>3</sup> в год из-за истощения основных месторождений и отсутствие финансирования в должной степени разработок новых месторождений.
5. Наступающий дефицит газа, несмотря на снижение потребления его внутреннем и внешних рынках.
6. Снижение поставок газа на основе выгодных экспортных контрактов, служащих ранее основным источником поддержания низких цен

на газ на внутреннем рынке, в связи с нестабильной геополитической обстановкой, санкциями и контрсанкциями.

В настоящее время Россия имеет тенденцию к целенаправленному приближению цен на энергоресурсы к уровню европейских стран, что при отсутствии роста ВВП РФ и тем более катастрофическому снижению реально располагаемых доходов населения, крайне негативно скажется на экономическом положении всех без исключения потребителей электроэнергии и газа.

Существует проблема труднодоступности, в некоторых случаях магистрального газоснабжения, а также повсеместное и необоснованное завышение ценообразования технологического присоединения к газо- и электросетям. Резерв мощности в российской электроэнергетике неуклонно снижается, и сетевые компании ограничивают технологическое присоединение потребителей. Цена за 1 кВт присоединяемой мощности сегодня доходит до 200 тыс. рублей и более, что делает альтернативные варианты электроснабжения (на основе биогаза) сопоставимыми по размеру капитальных затрат с сетевым электроснабжением.

Предлагаемая комплексная технология интегрированных анаэробных процессов биологического сбраживания и термохимического разложения органических отходов, с получением биогаза и вторичных высокоэнергичных продуктов направлена на решение указанных выше проблем.

Произведем упрощенный технико-экономический расчет целесообразности инвестирования средств на проектирование, изготовление, приобретение серийного оборудования, компоновку и пуско-наладочные работы разрабатываемого комплекса оборудования для анаэробной деструкции органических отходов. Разрабатываемый комплекс предназначен для утилизации органических бытовых отходов с получением альтернативных источников энергии (биогаз, синтез-газ) и вторичных высокоэнергичных продуктов (пиролизное масло, пикарбон, удобрение) для небольших муниципальных или индивидуальных образований, ТСЖ, ЖСК, коттеджных поселков. Например, при населении жилого комплекса в 100 человек, в сутки производится 0,36 тонн органических отходов. Согласно

морфологического анализа на жидкую фракцию (с учетом оборотной воды) приходится ~ 60% органических отходов. При анаэробном сбраживании получается около 67 м<sup>3</sup>/сут. биогаза, 0,3 т/сут. эффлюента (жидкого удобрения) с секции анаэробного брожения и 0,07 т/сут. пиролизного масла (переработка полиэтилен, пластик и другая упаковка ТКО), 0,02 т/сут. пикарбона, с секции пиролиза. Технологический комплекс состоит из каскада разрабатываемых биореакторов (3 шт.) диаметром 1,5 м и высотой 4,6 м и 1 серийной установки быстрого низкотемпературного пиролиза «Т-ПУ1». Срок полезного использования составляет 20 лет. Для обслуживания необходимо: 4 производственных рабочих (оператора) для работы комплекса 24 часа, 1 бригадир. Период планирования 5 лет. Цена продажи биогаза составляет 5,5 руб/м<sup>3</sup>. Цена продажи жидких удобрений 3520 руб/т. Цена продажи пиролизного масла 15000 руб/т. Цена продажи «биоугля» 13000 руб/т. Полученный биогаз расходуется на собственные нужды. Жидкие и твердые отходы (эффлюент, биомасло, биоуголь) реализуется на сторону.

### 3.1 Расчет капитальных вложений (инвестиций)

Общие капитальные затраты объекта включают в себя: затраты на технологическое оборудование и вспомогательное оборудование (включая доставку, установку); затраты на КИПиА и автоматизацию.

Ориентировочная стоимость основного оборудования приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Стоимость оборудования ( $K_{обор}$ )

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Амортизация, 10%
Универсальная установка низкотемпературного пиролиза «Т-ПУ1», 1 шт.	2700000	270000
Шредер для измельчения пищевых отходов InSinkErator 45, 30 шт.	330000	33000

Продолжение таблицы 3.1

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Амортизация, 10 %
Насос поверхностный Pedrollo Pkm 60, 1 шт.	5775	577
Arkal дисковый фильтр DF4 Super Leader, 1 шт	99000	9900
Мотор-редуктор ЗМП-40, 3 шт	46000	4600
мини-ТЕЦ TESSARI Energia COGSL205, 1 шт	5000000	500000
Скруббер для очистки биогаза от сероводорода и углекислого газа, 1 шт	200000	20000
Флотационно-фильтрационная установка ФФУ-10, 1 шт	1150000	115000
Изготовление спроектированного биореактора собственной конструкции, 3 шт	6000000	600000
<b>ИТОГО</b>	<b>15530775</b>	<b>1553077</b>

Капитальные затраты разрабатываемого комплексного оборудования определяются по укрупненным показателям сметной стоимости:

$$K_{затр} = K_{обор} + K_{пр} + K_{авт}, \quad (3.1)$$

где  $K_{пр}$  – капитальные затраты на строительство коммуникаций, сооружений и инфраструктуры (принимаются как 35% от стоимости всего оборудования), руб;

$K_{авт}$  – капитальные затраты на средства контроля и автоматизации комплекса (принимаются как 5% от всего оборудования), руб.

$$K_{затр} = 15530775 + 4659232,5 + 776538,75 = 20966546,25 \text{ рублей}$$

### 3.2 Расчет годовой производственной мощности

Производственная мощность разрабатываемого оборудования рассчитывается, с учетом, что для обеспечения нужд рассматриваемой

численности населения (100 человек) – 3 биогазовые установки сбраживания и 1 установка термохимического разложения.

*Производственная мощность по выходу продуктов переработки отходов*

$$M = Q_{\text{час}} \cdot \Phi_{\text{эф}}, \quad (3.2)$$

где  $Q_{\text{час}}$  – часовая производительность установки, м<sup>3</sup>/час;

$\Phi_{\text{эф}}$  – эффективный фонд времени работы оборудования в год, час

*Производственная мощность по выходу биогаза*

$$M_{\text{газ}} = 2,8 \cdot 8280 = 23184 \text{ м}^3$$

*Производственная мощность по выходу эффлюента*

$$M_{\text{эфф}} = 12,5 \cdot 8280 = 103500 \text{ кг}$$

*Производственная мощность по выходу биомасла*

$$M_{\text{б.м}} = 2,9 \cdot 8280 = 24012 \text{ кг}$$

*Производственная мощность по выходу биоугля*

$$M_{\text{б.у}} = 0,8 \cdot 8280 = 6624 \text{ кг}$$

Для упрощения расчета основные показатели работы комплекса, проводим по ведущему оборудованию, в данном случае основным оборудованием является биогазовая установка анаэробного сбраживания, а основной производственный процесс – анаэробное брожение органических отходов с выделением биогаза. В рассматриваемом проекте биогазовое оборудование работает круглосуточно, так как является основным источником энергообеспечения жилого комплекса. Остановка оборудования производится только для выполнения планового ремонта.

$$\Phi_{\text{эф}} = (D_{\text{к}} - D_{\text{рем}}) \cdot 24, \quad (3.3)$$

где  $D_{\text{к}}$  – календарная продолжительность года, сут;

$D_{\text{рем}}$  – простои оборудования на время планового ремонта, сут.

$$\Phi_{\text{эф}} = (365 - 20) \cdot 24 = 8280 \text{ часов}$$

### **6.3 Организация труда рабочих**

Разрабатываемый комплекс работает в круглосуточном режиме и

требует 4 человека производственного, так как принят двенадцатичасовой рабочий день и 4-х бригадный принцип комплектования.

Номинальный годовой фонд времени рабочего:

$$\Phi_{нр} = (D_k - D_{нр} - D_{вых}) \cdot T_{см} - D_{пред} \cdot T_{сок} \quad (3.4)$$

где  $D_k$  – количество календарных дней в году;

$D_{нр}$  – количество праздничных дней;

$D_{вых}$  – количество выходных;

$T_{см}$  – продолжительность рабочей смены;

$D_{пред}$  – количество предпраздничных дней;

$T_{сок}$  – сокращение времени в предпраздничный день, час.

$$\Phi_{нр} = (365 - 14 - 102) \cdot 8 - 4 \cdot 2 = 1984 \text{ часа}$$

Учитывая график сменности производственного рабочего – рабочими являются половина дней года и месяца, действительный фонд рабочего времени, рассчитываем по формуле:

$$\Phi_{др} = \frac{D_k}{D_{см}} \cdot T_{см}, \quad (3.5)$$

$$\Phi_{др} = \frac{365}{2} \cdot 12 = 2190 \text{ часа}$$

Количество часов переработки сверх нормы рабочего времени:

$$\Phi_{пер} = \Phi_{др} - \Phi_{нр}, \quad (3.6)$$

$$\Phi_{пер} = 2190 - 1984 = 206 \text{ часа}$$

Эффективный действительный фонд времени рабочего:

$$\Phi_{эдр} = \Phi_{др} \cdot \left(1 - \frac{B_0}{100}\right), \quad (3.7)$$

где  $B_0$  – процент времени планируемый на отпуск рабочих, больничный и т.п., (12%).

$$\Phi_{эдр} = 2190 \cdot \left(1 - \frac{12}{100}\right) = 1927 \text{ часа}$$

*Расчет заработной платы производственных рабочих.*

Для расчета используется средневзвешенная тарифная ставка ( $Z_{ср}$ ), по состоянию на 01.2019г. в размере 213 рублей.

Годовой фонд заработной платы:

$$Z_{год} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.8)$$

где  $Z_{осн}$  – основной фонд заработной платы;

$Z_{доп}$  – дополнительный фонд заработной платы

$$Z_{осн} = Z_{тар} + Z_{прем} + Z_{празд} + Z_{ночн} + Z_{св.н}, \quad (3.9)$$

где  $Z_{тар}$  – оплата по тарифу;

$Z_{прем}$  – премия;

$Z_{празд}$  – доплата за праздничные дни;

$Z_{ночн}$  – доплата за ночное время;

$Z_{св.н}$  – доплата за сверхнормы рабочего времени

$$Z_{доп} = Z_{отп} + Z_{уч} + Z_{гос}, \quad (3.10)$$

где  $Z_{отп}$  – оплата дней отпуска;

$Z_{уч}$  – оплата ученических отпусков ( $Z_{уч} = 0$ );

$Z_{гос}$  – оплата дней за выполнение государственных обязанностей,

( $Z_{гос} = 0$ )

Оплата по тарифу:

$$Z_{тар} = Z_{ср} \cdot \Phi_{эдр} \cdot \Sigma Ч_{сн} \cdot K_з, \quad (3.11)$$

где  $K_з$  – коэффициент загрузки, ( $K_з = 1$ );

$Ч_{сн}$  – численность сотрудников предприятия

$$Z_{тар} = 213 \cdot 1927 \cdot 4 = 1641804 \text{ рублей}$$

премия:

$$Z_{прем} = Z_{тар} \cdot K_{ПР}, \quad (3.12)$$

где  $K_{ПР}$  – коэффициент премий, ( $K_{ПР} = 0,4$  (40%))

$$Z_{прем} = 1641804 \cdot 0,4 = 656721 \text{ рублей}$$

доплата за праздничные дни:

$$Z_{празд} = Z_{ср} \cdot t_{см} \cdot n_{см} \cdot Ч_я \cdot Д_{пр} \cdot K_з, \quad (3.13)$$

где  $t_{см}$  – продолжительность смены, час;

$n_{см}$  – число смен в сутки

$$Z_{празд} = 213 \cdot 12 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 1 = 71568 \text{ рублей}$$

доплата за ночное время:

$$Z_{ночн} = Z_{мар} \cdot \frac{1 + K_n}{3 \cdot K_3}, \quad (3.14)$$

где  $K_n$  – ночной коэффициент, ( $K_n = 1,2$ )

$$Z_{ночн} = 1641804 \cdot \frac{1 + 1,2}{3 \cdot 1} = 1203989 \text{ рублей}$$

доплата за сверхнормы рабочего времени:

$$Z_{св.н} = Z_{ср} \cdot \Phi_{пер} \cdot \Sigma Ч_{сн} \cdot K_{св.н} \cdot K_3, \quad (3.15)$$

где  $K_{св.н}$  – коэффициент сверхнормы, ( $K_{св.н} = 0,4$ )

$$Z_{св.н} = 213 \cdot 206 \cdot 4 \cdot 0,4 \cdot 1 = 70205 \text{ рублей}$$

$$Z_{осн} = 1641804 + 656721 + 71568 + 1203989 + 70205 = 3644287 \text{ рублей}$$

Оплата дней отпуска:

$$Z_{отп} = Z_{осн} \cdot \frac{\Phi_{др} - \Phi_{эдр}}{\Phi_{эдр}}, \quad (3.16)$$

$$Z_{отп} = 3644287 \cdot \frac{2190 - 1927}{1927} = 497378 \text{ рублей}$$

$$Z_{доп} = 497378 \text{ рублей}$$

$$Z_{год} = 3643264 + 497378 = 4140642 \text{ рублей}$$

Единый социальный налог:

$$E_{сн} = Z_{год} \cdot K_c, \quad (3.17)$$

где  $K_c$  – коэффициент социального страхования, ( $K_c = 0,356$ )

$$E_{сн} = 4140642 \cdot 0,356 = 1474068 \text{ рублей}$$

#### 6.4 Организация управления производством

К штату обслуживающего биогазовое оборудование персонала (производственных рабочих) прикреплен один руководитель, работающий по 8 часов в день с двумя выходными в неделю.

$$\Phi_{нр} = \Phi_{др}$$

$$\Phi_{нр} = \Phi_{др} = (365 - 14 - 102) \cdot 8 - 5 \cdot 1 = 1987 \text{ часа}$$

$$\Phi_{эдр} = 1987 \cdot 1 - \frac{12}{100} = 1748 \text{ часа}$$

Тарифная ставка руководителя на 20% больше, чем у

производственных рабочих, что составляет – 256 рублей.

Оплата по тарифу:

$$Z_{тар} = 256 \cdot 1748 \cdot 1 = 447488 \text{ рублей}$$

премия:

$$Z_{прем} = 447488 \cdot 0,4 = 178995 \text{ рублей}$$

доплата за праздничные дни:

$$Z_{празд} = 256 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 1 = 28762 \text{ рублей}$$

$$Z_{осн} = 447488 + 178995 + 28762 + 0 + 0 = 655245 \text{ рублей}$$

Оплата дней отпуска:

$$Z_{отп} = 655245 \cdot \frac{1987 - 1748}{1748} = 89590 \text{ рублей}$$

$$Z_{год} = 655245 + 89590 = 744835 \text{ рублей}$$

$$E_{сн} = 744835 \cdot 0,356 = 265161 \text{ рублей}$$

## 6.5 Расчет себестоимости производимой продукции

С целью упрощения расчетов и учитывая, что расчет показателей производится по ведущему оборудованию (биогазовая установка анаэробного сбраживания), а основной производственный процесс – анаэробное сбраживание. Рассчитаем себестоимость производства 1 м<sup>3</sup> биогаза, являющимся товарной продукцией. Основой для расчета являются: калькуляция себестоимости продукции, результаты расчетов по организации труда и заработной платы всех работников участка.

Для производства 1 м<sup>3</sup> биогаза данной биогазовой установке требуется 0,003 т. жидких органических отходов. Расходы на биосырье отсутствуют, так как они образуются естественным путем, и подаются в секцию анаэробного брожения после сепарации и автоматически в виде оборотной канализационной воды.

Годовой расход сетевой электроэнергии:

$$P_{э.год} = \frac{N_{дв} \cdot K_{з.дв} \cdot K_{зN} \cdot \Phi_{эф}}{\eta_{дв} \cdot \eta_c}, \quad (3.18)$$

где  $K_{з.дв}$  – коэффициент загрузки электродвигателей по времени, ( $K_{з.дв} = 0,1$ ), так как электродвигатели включаются несколько раз в сутки для перемешивания и выгрузки отработанной биомассы;

$K_{з.Н}$  – коэффициент загрузки электродвигателей по мощности, ( $K_{з.Н} = 0,1$ ), так как расход сетевой электроэнергии требуется только в момент запуска установки;

$\Sigma N_{дв}$  – суммарная мощность электродвигателей, кВт;

$\eta_{дв}$  – КПД электродвигателей, ( $\eta_{дв} = 0,95$ );

$\eta_c$  – КПД электросети участка, ( $\eta_c = 0,95$ )

$$P_{э.год} = \frac{4,5 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 8280}{0,95 \cdot 0,95} = 413 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Расход сетевой электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> продукции:

$$P_{э,уд} = \frac{P_{э.год}}{M}, \quad (3.19)$$

$$P_{э,уд} = \frac{413}{23184} = 0,018 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$$

*Расчет по заработной плате*

Затраты на заработную плату определяются, исходя из рассчитанного фонда заработной платы рабочих участка.

Основная заработная плата на один м<sup>3</sup> продукции:

$$З_{осн.у} = З_{осн}/M / 1000, \quad (3.20)$$

Дополнительная заработная плата на один м<sup>3</sup> продукции:

$$З_{доп.у} = З_{доп}/M / 1000, \quad (3.21)$$

Отчисления на социальное страхование на один м<sup>3</sup> продукции:

$$E_{сн.у} = E_{сн}/M / 1000, \quad (3.22)$$

Для производственного рабочего:

$$З_{осн.у} = 3644287/23184/1000 = 0,16 \text{ рубля}$$

$$З_{доп.у} = 497378/23184/1000 = 0,02 \text{ рубля}$$

$$E_{сн.у} = 1474068/23184/1000 = 0,06 \text{ рубля}$$

Для руководителя:

$$Z_{осн.у} = 655245 / 23184 / 1000 = 0,03 \text{ рубля}$$

$$Z_{доп.у} = 89590 / 23184 / 1000 = 0,004 \text{ рубля}$$

$$E_{сн.у} = 265161 / 23184 / 1000 = 0,01 \text{ рубля}$$

*Расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования*

По данной статье учитываются следующие затраты (таблица 3.2):

- амортизация оборудования (данные в таблице 3.1);
- содержание оборудования (запасные части, расходные материалы, накладные расходы), текущий ремонт – 30% от амортизации оборудования;
- содержание инструментов и приспособлений – 5% от амортизации оборудования;
- прочие расходы – 1% от амортизации оборудования.

Таблица 3.2 – Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Наименование статей	Сумма, руб., $P_{об.}$
Амортизация оборудования	1553077
Содержание оборудования	465923
Содержание инструментов и приспособлений	77654
Прочие расходы	155308
ИТОГО	2251962
Затраты на выпуск 1 м <sup>3</sup> продукции	0,1

Затраты на 1 м<sup>3</sup> продукции:

$$P_{об.у} = P_{об.}/M / 1000 , \quad (3.23)$$

$$P_{об.у} = 2251962 / 23184 / 1000 = 0,1 \text{ рублей}$$

*Расчет цеховых расходов*

По данной статье учитываются следующие затраты (таблица 3.3):

- амортизация зданий (2% от его стоимости) – 0;
- содержание зданий – 0;
- затраты на охрану труда – 10% от зарплаты всех сотрудников;
- прочие расходы – 0,5% от зарплаты всех сотрудников

Результаты расчетов сводятся в таблицу 3.4

Таблица 3.3 – Расчет цеховых расходов

Наименование статей	Сумма, руб., $P_{ц.}$
Амортизация зданий	0
Содержание зданий	0
Охрана труда	429953
Прочие расходы	21497
ИТОГО	451450
Затраты на выпуск 1 м <sup>3</sup> продукции	0,02

Затраты на 1 м<sup>3</sup> продукции:

$$P_{ц.у} = P_{ц.}/M / 1000 , \quad (3.24)$$

$$P_{ц.у} = 451450 / 23184 / 1000 = 0,02 \text{ рублей}$$

Цеховая себестоимость:

$$C_{ц} = P_{с.у} + P_{э.у} + Z_{осн.у} + Z_{доп.у} + E_{сн.у} + P_{об.у} + P_{ц.у} , \quad (3.25)$$

$$C_{ц} = 0 + 0,018 + 0,19 + 0,024 + 0,07 + 0,1 + 0,02 = 0,422 \text{ рублей}$$

Общие расходы:

$$P_{общ} = Z_{осн.у} \cdot K_{затр} / M / 1000 , \quad (3.26)$$

$$P_{общ} = 0,19 \cdot 20966546,25 / 23184 / 1000 = 0,17 \text{ рублей}$$

Производительная себестоимость:

$$C_{пр} = C_{ц} + P_{общ} , \quad (3.27)$$

$$C_{пр} = 0,422 + 0,17 = 0,6 \text{ рублей}$$

Внепроизводственные расходы:

$$P_{внепр} = C_{пр} \cdot K_{внепр} , \quad (3.28)$$

$$P_{внепр} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03 \text{ рублей}$$

Полная себестоимость:

$$C_n = C_{пр} + P_{внепр} , \quad (3.29)$$

$$C_n = 0,6 + 0,03 = 0,63 \text{ рублей}$$

### 3.6 Расчет экономической эффективности проекта

Определим ожидаемую прибыль за счет снижения себестоимости основных видов продукции:

### *Производство биогаза*

$$P_{p.ож.газ} = (C_{рын.газ} - C_n) \cdot 10 \cdot M_{газ}, \quad (3.30)$$

где  $C_{рын.газ}$  – рыночная стоимость 1 м<sup>3</sup> природного газа, ( $C_{рын.газ} = 5,5$  рублей), на 01.01.2019г

$$P_{p.ож.газ} = (5,5 - 0,63) \cdot 10 \cdot 23184 = 1129060 \text{ рублей}$$

### *Производство удобрения*

$$P_{p.ож.эфф} = (C_{рын.эфф} - C_n) \cdot 10 \cdot M_{эфф}, \quad (3.31)$$

где  $C_{рын.эфф}$  – рыночная стоимость 1 кг жидких удобрений, ( $C_{рын.эфф} = 1,17$  рублей), на 01.01.2019г

$$P_{p.ож.эфф} = (1,17 - 0,63) \cdot 10 \cdot 103500 = 558900 \text{ рублей}$$

### *Производство биомасла*

$$P_{p.ож.бм} = (C_{рын.бм} - C_n) \cdot 10 \cdot M_{бм}, \quad (3.32)$$

где  $C_{рын.бм}$  – рыночная стоимость 1 кг биомасла, ( $C_{рын.бм} = 15$  рублей), на 01.01.2019г

$$P_{p.ож.бм} = (15 - 0,63) \cdot 10 \cdot 24012 = 3450524 \text{ рублей}$$

### *Производство биоугля*

$$P_{p.ож.бу} = (C_{рын.бу} - C_n) \cdot 10 \cdot M_{бу}, \quad (3.33)$$

где  $C_{рын.бу}$  – рыночная стоимость 1 кг биоугля, ( $C_{рын.бу} = 13$  рублей), на 01.01.2019г

$$P_{p.ож.бу} = (13 - 0,63) \cdot 10 \cdot 6624 = 819388 \text{ рублей}$$

### *Общая ожидаемая прибыль*

$$P_{p.ож} = P_{p.ож.газ} + P_{p.ож.эфф} + P_{p.ож.бм} + P_{p.ож.бу}, \quad (3.34)$$

$$P_{p.ож} = 1129060 + 558900 + 3450524 + 819388 = 5957872 \text{ рублей}$$

### *Определим налог на прибыль:*

$$H_{np} = P_{p.ож} \cdot K_{нал}, \quad (3.31)$$

где  $K_{нал}$  – ставка налога на прибыль, ( $K_{нал} = 24\%$ )

$$H_{np} = 5957872 \cdot 0,24 = 1429889 \text{ рублей}$$

### *Чистая ожидаемая прибыль:*

$$P_{p.чист} = P_{p.ож} - H_{np}, \quad (3.32)$$

$$P_{p.чист} = 1129060 - 1429889 = 4527982 \text{ рублей}$$

Определим расчетный срок окупаемости капитальных вложений (инвестиций), необходимых для осуществления проекта:

$$T_{ок} = K_{затр} / П_{р.чист} , \quad (3.33)$$

$$T_{ок} = 20966546,25 / 4527982 = 4,63 \text{ (5 лет)}$$

В таблице 3.4 представлены основные рассчитанные технико-экономических показателей проекта

Таблица 3.4 – Техничко-экономические показатели проекта

Показатели	Ед. изм.	Значение показателя
Производственная мощность		
По биогазу	м <sup>3</sup>	23184
По эффлюенту	кг	103500
По биомаслу	кг	24012
По биоуглю	кг	6624
Себестоимость продукции	руб	0,63
Условно-годовая прибыль	руб	5957872
Капитальные вложения	руб	20966546
Чистая прибыль	руб	4527982
Срок окупаемости	год	5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе реализации проекта была спроектирована оригинальная конструкция секции анаэробного сбраживания. Данная конструкция предполагает работу по замкнутому циклу, с использованием оборотной воды, для утилизации жидкой фракции органических отходов, и внедрения ее в предлагаемую концептуальную схему процесса превращение анаэробной деструкции органических отходов совместно с малогабаритными модульными системами термохимической переработки «Т-ПУ1» серийного производства.

Преимуществом предлагаемой интеграции технологий быстрого пиролиза и анаэробного сбраживания, для утилизации промышленных и бытовых отходов, в сравнении с другими применяемыми технологиями (прямое сжигание и т. д.) является возможность построения самоокупаемых непрерывных производств по утилизации отходов, с достаточной управляемостью и замкнутостью технологического процесса (без антропогенных «выбросов» в окружающую среду), с возможностью разделения продуктов быстрого пиролиза и анаэробного сбраживания на фракции (жидкая, твердая, газообразная), из которых можно извлекать «чистые» химические соединения и вторично запускать их в промышленный оборот.

Согласно проведенного экономического обоснования проекта можно сделать заключение о его экономической целесообразности, при этом следует отметить, что данный расчет упрощенный и не включает определения эколого-экономических преимуществ от количества вредных веществ, не поступивших в атмосферу, вследствие их размещения на полигонах. Также расчет не включал расходов по вывозу отходов на место их захоронения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрижиевский, А. Энергосбережение и энергетический менеджмент : учеб. пособие / А.А. Андрижиевский. – 2-е изд., испр. – Минск : Вышэйш. шк., 2005. – 294 с. : ил.
2. Аристархов, Д. Технологии переработки отходов растительной биомассы, технической резины и пластмассы / Д.В. Аристархов, Г.И. Журавский и др. // Инженерно-физический журнал. – 2001. – № 6. – С. 152 – 156.
3. A.R. Reed, P.T. Williams, Thermal processing of biomass natural fibre wastes by pyrolysis, *Int. J. Energy Res.* 28 (2004) 131–145.
4. A. Karaduman, M. Cetin Kocak, A. Bilgesu, Flash vacuum pyrolysis of low density polyethylene in a free-fall reactor, *Polym. Plast. Technol. Eng.* 42 (2003) 181–191.
5. Бобович, Б. Переработка отходов производства и потребления : справочное пособие / Б.Б. Бобович, В.В. Девяткин ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Б. Бобовича. – Москва : «СП Интермет Инжиниринг», 2000. – 496 с. : ил.
6. Бактериальное биоразнообразие в анаэробном биореакторе с восходящим потоком [жидкости] с ANAMMOX активностью инокулированном илом [отходов] свиноводства. Bacterial biodiversity from an anaerobic up flow bioreactor with ANAMMOX activity inoculated with swine sludge / Viancelli Aline, Kunz Airton, Esteves Paulo Augusto, Vicoso Bauermann Fernando, Furukawa Kenji, Fujii Takao, Vasconcellos Antonio Regina, Vanotti Matias // *Braz. Arch. Biol. and Technol.* – 2011. – 54, № 5. – С. 1035 – 1041. – Англ.
7. Benyamin, K. Process performance and modelling of anaerobic digestion using source-sorted organic household waste /K. Benyamin and others // – *Bioresource Technology* 247 (2017) 486 – 495.

8. Bridgwater AV, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Org Geochem*, 1999;30:1479–93.
9. Волков, А. Проблема утилизации твердых бытовых отходов // Чистый город. – 2010.
10. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика : учебное пособие / Г.К. Лобачев, В.Ф. Желтобрюхов и др. – Волгоград, 1999. – 180 с.
11. Гомоницкая, А. Заболотских В.В., Нагайцева М.П. Внедрение дуальной системы сбора ТБО в г. Тольятти: проблемы и перспективы/ А.А. Гомоницкая, В.В. Заболотских, М.П. Нагайцева // материалы IX Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». – 2015. – С. 5 – 8. (8)
12. ГОСТ 55571-2013 Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013 – 6 с.
13. Гринин, А. Промышленные и бытовые отходы : Хранение, утилизация, переработка : учеб. пособие / А.С. Гринин, В.Н. Новиков. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 332 с. : ил.
14. Gupta VK, Potumarthi R, O'Donovan A, Kubicek CP, Sharma GD, Tuohy MG. Bioenergy research: An overview on technological developments and bioresources. In: Gupta VG, Tuohy M, Kubicek CP, Saddler J, Xu F, editors. *Bioenergy Res. Adv. Appl.* 1st ed. Elsevier B.V.; 2014. p. 23–47.
15. Gis W, Samson-bręk I. Review of technology for cleaning biogas to natural gas quality. *Automot Ind Inst PIMOT*, 2012;2012:33–9.
16. Димитриев А. Д. Биохимия : учеб. пособие / А. Д. Димитриев, Е. Д. Амбросьева. – Москва : Дашков и К, 2010. – 165 с. : ил.
17. Diego, M. Gasification of Municipal Solid Waste for Power Generation in Brazil, a Review of Available Technologies and Their Environmental Benefits/M. Diego and others // – *J. Chem. Chem. Eng.* 10 (2016)P. 249 – 255.

18. Demirbas A. Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Convers Manag*, 2009;50:2782–801.
19. Da costa gomez C. Biogas as an energy option: An overview. In: Wellinger A, Patrick Murphy J, Baxter D, editors. *Biogas Handb. Sci. Prod. Appl.* Woodhead, 2013. p. 1–16.
20. Dussadee N, Ramaraj R, Cheunbarn T. Biotechnological application of sustainable biogas production through dry anaerobic digestion of napier grass. *3 Biotech*, 2017;7.
21. J. Li, H. Duan, K. Yu, L. Liu, S. Wang, Characteristic of low-temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere, *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (2010) 810–815
22. I. Kim, D. Kim, S. Hyun, Effect of particle size and sodium ion concentration on anaerobic thermophilic food waste digestion, *Water Sci Technol*, 2000; 41: 67 – 73.
23. I.D.V. Torri, V. Paasikallio, C.S. Faccini, R. Huff, E.B. Caramão, V. Sacon, et al., Bio-oil production of softwood and hardwood forest industry residues through fast and intermediate pyrolysis and its chromatographic characterization, *Bioresour. Technol.* 200 (2016) 680–690
24. Караева, В. Эффективность перемешивания в анаэробных реакторах / Ю.В. Караева, И.А. Трахунова // Тезисы докладов XII Международной школыконференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск. – 2012. – с. 56.
25. Комов, В. Биохимия : учеб. для вузов / В.П. Комов, В.Н. Шведова. – 2-е изд., испр. ; Гриф МО. – Москва : Дрофа, 2006.– 639 с. : ил.
26. Кольман, Я. Наглядная биохимия =Taschenatlas der Biochemie / Я. Кольман, К.-Г. Рём; пер. с нем. Л. В. Козлова [и др.] ; под ред. П. Д. Решетова, Т. И. Соркиной. –Изд. 4-е. – Москва : Бинوم. Лаборатория знаний, 2011. – 469 с. : ил.

27. Келов, К. Исследование показателей производительности биогазовых реакторов при метановом сбраживании органических отходов животноводства / К.Келов[и др] // Изв. АН ТССР, Сер. физ-техн., хим. и геолог.н. –1990 – № 3 – с. 54–57.
28. Калыгин, В. Промышленная экология : учеб. пособие для студентов вузов / В. Г. Калыгин. – Москва : Academia, 2004. – 431 с. : ил.,
29. Кураков, В. Технология полного цикла обращения с отходами / В. М. Кураков // ЖКХ : журн. руководителя и гл. бухгалтера. – 2009. – № 2, Ч. 1. – С. 55 – 58.
30. Kararaju P, Serrano M, Thomsen AB, Kongjan P, Angelidaki I. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. *Bioresour Technol*, 2009;100:2562 – 8.
31. Ларионов, Г. Утилизация ТБО – одна из приоритетных экономических задач современности / Г. Ларионов // РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2009. – № 4. – С. 207–208.
32. Le DM, Sørensen HR, Meyer AS. Elemental analysis of various biomass solid fractions in biorefineries by X-ray fluorescence spectrometry. *Biomass Bioenergy*, 2017;97:70–6.
33. Мелентьев, Г. Промышленные и бытовые отходы: инновационная политика и научно-производственное предпринимательство как средство решения проблемы / Г. Мелентьев // Экология пром. пр-ва. – 2003. – N 4. (17)
34. Милицкова, Е. Рециклинг отходов / Е.А. Милицкова // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: Обзорная информация / ВИНТИ. – Москва, 1997. – № 3. – С. 52 – 70.
35. Mohsin R, Majid ZA, Shihnan AH, Nasri NS, Sharer Z. Effect of biodiesel blends on engine performance and exhaust emission for diesel dual fuel engine. *Energy Convers Manag*, 2014;88:821–8
36. Masebinu SO, Aboyade A, Muzenda E. Enrichment of biogas for use as vehicular fuel: A review of the upgrading techniques. *Int J Res Chem Metall Civ Eng*, 2014; 1:89 – 98.

37. M.F. Demirbas, Characterization of Bio-oils from Spruce wood via Pyrolysis, Energy Sources, Part A Recover Util. Environ. Eff. 32 (2010) 909–916
38. Narra M, Nagori GP, Pushalkar S. Biomethanation of household waste organic waste at high solid content a package for waste disposal and energy generation. In: Proceedings of International Conference on Energy and Environment March [9 – 2], 2009.
39. Охрана окружающей среды в России. 2012: Статистический сборник / Росстат. М, 2012.
40. Обращение с отходами производства и потребления в системе экологической безопасности : научно-методическое пособие / В. А. Грачев, А. Т. Никитин, С. А. Фомин и др. ; под общ. ред. член-корр. РАН, проф. В. А. Грачева и проф. А. Т. Никитина. – Москва : Изд-во МНЭПУ, 2009. – 500 с.
41. Паршина, С. Анаэробная обработка отходов животноводства в экспериментальных условиях / С. Паршина [и др] // Микробиол. Охрана биосферы в регионах Урала и Сев. Прикаспия: Тез. докл. Всес.симп. – Оренбург. 1991 – с. 98 – 99.
42. Проскурина, И. Биохимия : учеб. пособие для вузов / И.К. Проскурина. – Гриф МО. – Москва : ВЛАДОС-ПРЕСС, 2001. – 236 с. : ил.
43. Пурим, В. Бытовые отходы. Теория горения. Обезвреживание. Топливо для энергетики / В.Р. Пурим. – Москва : Энергоатом- издат, 2002 – 112 с.
44. Пальгунов, П. Утилизация промышленных отходов / П.П. Пальгунов, М. В. Сумароков. – Москва : Стройиздат, 1990. – 352 с.
45. Пат. 2427123 Российская Федерация. МПК А01С 3/02, МПК С02F 11/04, С02F11/04. Биореактор [Текст] / Осетров В.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Ижевский государственный технический университет – № 2010112092/21; заявл. 29.03.2010; опубл. 27.08.2011.
46. Пат. 2228583 Российская Федерация. А01С003/00, С02F011/04. Биореактор [Текст] / Андрюхин Т.Я.; заявитель и патентообладатель

Андрюхин Т.Я. – № 2002125432/122002125432/12; заявл. 10.09.2002; опубл. 20.05.2004.

47. Родионов, А. Технологические процессы экологической безопасности / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, – 2000. – 800 с.

48. R. Zhang, H.M. El-Mashad, K. Hartman, F. Wang, G. Liu, C. Choate, P. Gamble, Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion, *Bioresour Technol*, 2007; 98: 929 – 935.

49. Сазыкин, Ю. Биотехнология: учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений / Ю.О. Сазыкин, С. Н. Орехов, И.И. Чакалева; под ред. А.В. Катлинского. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008.

50. Степановских, А. Биологическая экология : теория и практика : учеб. для вузов / А.С. Степановских. – Гриф УМО. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2009. – 791 с. : ил.

51. C. Balcik-Canbolat, B. Ozbey, N. Dizge, B. Keskinler, Pyrolysis of commingled waste textile fibers in a batch reactor: analysis of the pyrolysis gases and solid product, *Int. J. Green Energy* 14 (2017) 289–294

52. Sawatdeenarunat C, Surendra KC, Takara D, Oechsner H, Khanal SK. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresour Technol*, 2015;178:178 – 86.

53. S. Ghanimeh, M. El Fadel, and P. Saikaly, «Mixing effect on thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste», *Bioresource Technology*, vol. 117, pp. 63 – 71, August 2012.

54. Song Z, Yang G, Guo Y, Zhang T. Comparison of two chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion. *BioResources*, 2012;7:3223 – 36.

55. Solantausta, Y., Nylund, N.O., Westerholm, M., Koljonen, T. & Oasmaa, A.: Woodpyrolysis oil as a fuel in a diesel power plant. *Bioresour. Technol.* 46 (1993), pp. 177 – 188.

56. Тимонин, А. Основы расчёта и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник : в 3-х томах. / А. С. Тимонин. – 2-е. изд. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, – 2002. – Т. 2. – 996 с.
57. Твёрдые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание). Справочник / В. Г. Систер и др. – Москва : АКХ им. К. Д. Памфилова, 2001. – 316 с.
58. Thomas Kupper. Kompost und Gargut in der Schweiz: Herausgeber Bundesamt für Umwelt BAFU, – Bern., 2007. – 38 p.
59. Tkachenko, S.Y., Bochkova, O.Y. Biogas plant with the system of circulation circuits / S.Y Tkachenko, O.Y.Bochkova //SCIENTIFIC WORKS OF VINNYTSIA NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY. – Vinnytsia. – 2016. – №4. – P. 56 – 62.
60. УМКД «Промышленная экология» [Электронный ресурс] : спец. 280102 «Безопасность технологических процессов и производств» / ТГУ ; каф. «Управление промышленной и экологической безопасностью». – ТГУ. – Тольятти : ТГУ, 2007– 100-00.
61. Установка для получения биогаза. Die Auslegung von Biogasanlagen / Finsterwalder Klemens // WWT: Wasserwirt. Wassertechn. : Das Praxismagazin für Entscheidungen im Wassermanagement. – 2009. – № 11–12. – С. 8–16. – Нем.
62. Ullah I, Ha M, Othman D, Hashim H, Matsuura T, Ismail AF, et al. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage, 2017; 150: 277 – 94.
63. Fatih Demirbas M. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. Appl Energy 2009;86:S151–61.
64. F. Fantozzi, S. Colantoni, P. Bartocci, U. Desideri, Rotary Kiln slow pyrolysis for syngas and char production from biomass and waste – Part I: working envelope of the reactor, J. Eng. Gas Turbines Power 129 (2007) 901

65. Haghghi Mood S, Hossein Golfeshan A, Tabatabaei M, Salehi Jouzani G, NajafiGH, Gholami M, et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013;27:77 – 93.
66. H.-S. Shin, J.-H. Youn, S.-H. Kim, Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis, *Int J Hydrogen Energy*, 2004; 29: 1355 – 1363.
67. Hoogendoorn, A., Ouwerkerk, H., Adriaans, T., Rindt, C., deLange, R. & van Oijen, J.: Bio-oil instationarygasturbines – technical&economicalfeasibility. Ingenia, Eindhoven, Reportnr. 0656525-R07, 2007.
68. Шаповалов, С. Энергосбережение и энергосберегающие технологии : учеб. пособие / С.В. Шаповалов, О.В. Самолина, Н.А. Шаповалова; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники; каф. «Электроснабжение и электротехника». – ТГУ. – Тольятти : ТГУ, 2012. – 98 с. : ил.
69. Шубов, Л. Технология твёрдых бытовых отходов : учебник / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник ; под ред. Л. Я. Шубова. – Москва : Альфа-М: ИН-ФА-М, 2011. – 400 с.
70. Экология энергетики : учеб. пособие / под общ. ред. В.Я. Путилова. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 716 с. : ил.
71. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : (справ. пособие) / под ред. Л. Д. Богуславского [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1990. – 621 с. : ил.
72. Jouhara, H. Municipal waste management systems for domestic use / H. Jouhara and others // – *Energy* 139 (2017) 485 – 506.