

Authors:**A. V. Malinin**¹, Postgraduate student;**K. G. Volkov**²✉, Candidate of Technical Sciences, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0606-5481>;**P. V. Dorodov**³, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>^{1,3}Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,

34 Tatiany Baramzinoy St., Izhevsk, Russia, 426067

²wolkow-kirill@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 29.07.2024;

принята к публикации 06.09.2024.

The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 29.07.2024; accepted for publication 06.09.2024.

Научная статья

УДК 628.336.6

DOI 10.48012/1817-5457_2024_3_128-137

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Паршикова Марианна Викторовна¹✉, **Паршиков Станислав Геннадьевич**²,
Касаткин Владимир Владимирович³, **Касаткина Надежда Юрьевна**⁴,
Касаткин Владимир Вениаминович⁵✉^{1,2,3}ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия^{4,5}Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия¹marianna.svalova@yandex.ru⁵kasww@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – провести анализ конструктивных особенностей и режимов работы биогазовой установки для повышения эффективности технологического процесса утилизации отходов животноводства. Исследования проведены на экспериментальной площадке базовой кафедры «Инженерные системы ЖКХ» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова в 2023 г. Разработана конструкция двухсекционного биореактора и общая схема этапов работы биогазовой установки. Технологический процесс предусматривал объединение в единый цикл двух режимов анаэробного сбраживания – мезофильного и термофильного. Мезофильный режим предполагал продолжительность опыта в течение 5 суток в температурном диапазоне 30–35 °С, термофильный режим – в течение 10 суток при температуре 50–53 °С, которая достигается путем дополнительного обогрева теплообменником. Образующийся в результате сбраживания биогаз поступает в газгольдер, в дальнейшем газовая смесь подается на очистку в установку для комплексной подготовки газа. Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует, что оптимальная продолжительность процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства в биореакторе объемом 0,8 м³ при добавлении активатора процесса в термофильном режиме работы биогазовой установки составила 10 дней, оптимальная концентрация биогаза достигла показателя 5,78 %. Внедрение биогазовых установок на предприятиях АПК в Удмуртской Республике позволит получить годовой экономический эффект в размере 25 802 руб. для крестьянско-фермерского хозяйства с содержанием 10 голов КРС при использовании энергоэффективной трехстадийной технологии анаэробного сбраживания отходов животноводства и использовании биогазовой установки в технологическом процессе обработки отходов, срок окупаемости проекта составит 3,9 года.

Ключевые слова: биогазовая установка, мезофильный режим сбраживания, термофильный режим сбраживания.

Для цитирования: Анализ конструктивных особенностей и режимов работы биогазовой установки / М. В. Паршикова, С. Г. Паршиков, В. В. Касаткин [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3(79). С. 128-137. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_3_128-137.

Актуальность исследований. Считается, что вопрос утилизации отходов животноводства достаточно остро стоит перед крупными агрокомплексами, а частные малые хозяйства с данным вопросом справляются вполне успешно. Несомненно, объем отходов животноводства таких хозяйств, например, навоз крупного рогатого скота, не столь велик, однако использовать свежий навоз КРС в качестве удобрения не рекомендуется согласно приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. № 551. Для обеззараживания навоза требуется выдержка не менее 1 года. Хранение в навозохранилищах или площадках для хранения и биотермического обеззараживания навоза имеет ряд недостатков: обустройство мест для хранения с защитой от атмосферных осадков, значительные площади для хранения, негативное воздействие на почву и подземные воды, наносит вред окружающей природной среде. Согласно классификатору отходов 2024 г., к отходам животноводства относится навоз крупного рогатого скота (КРС) свежий, 4-го класса опасности, и перепревший навоз КРС, 5-го класса опасности. В связи с негативным воздействием органических отходов на почву и подземные воды, а также нарастанием дефицита сырьевых ресурсов актуальной становится проблема энергоэффективного использования отходов животноводства с применением биогазовой установки [1, 2, 8].

Цель исследований: провести анализ конструктивных особенностей и режимов работы биогазовой установки для повышения эффективности технологического процесса утилизации отходов животноводства.

Задачи исследований:

- 1) изучить влияние мезофильного и термофильного режимов сбраживания на максимальную выработку биогаза;
- 2) определить оптимальные конструктивные особенности биогазовой установки;
- 3) провести экономический анализ эффективности технологического процесса обработки отходов животноводства в экспериментальной биогазовой установке.

Материал и методика исследований.

На основании анализа международных и российских технологий анаэробного сбраживания отходов животноводства и оборудования, при-

меняемого в технологическом процессе, разработана конструкция двухсекционного биореактора и общая схема этапов работы биогазовой установки, используемой при утилизации отходов животноводства, которая представлена на рисунке 1 [3, 4, 6, 16].

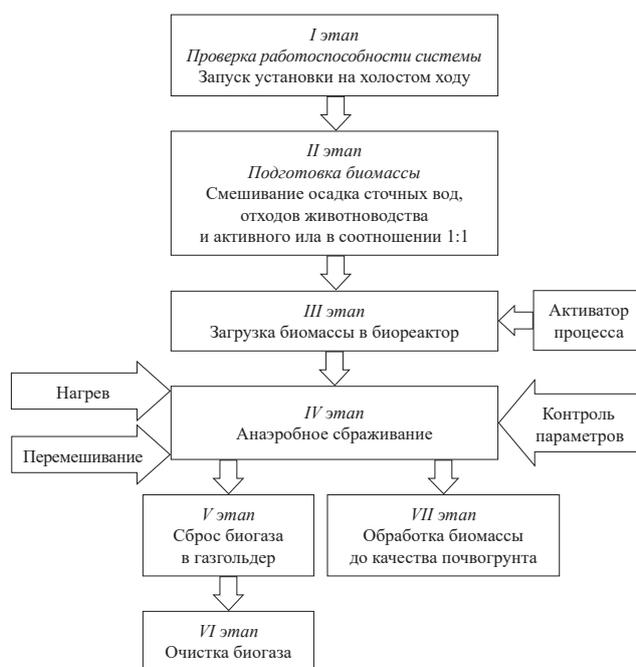


Рисунок 1 – Общая схема этапов работы биогазовой установки в процессе анаэробного сбраживания отходов животноводства

В результате проведенного теоретического анализа конструктивных особенностей биогазовых установок и технологического процесса в биореакторе разработана методика исследований [5, 9–11]:

1. Постановка задачи теоретических и экспериментальных исследований.
2. Определение типа сложности теоретического и экспериментального исследования.
3. Разработка алгоритма теоретического и экспериментального исследования.
4. Формализация функционирования сложных систем технологических процессов в биогазовой установке.
5. Определение режимов загрузки и выгрузки субстрата в биогазовую установку.
6. Определение способа перемешивания отходов животноводства в биогазовой установке.
7. Определение способа подогрева отходов животноводства в биогазовой установке.

Исследования по повышению эффективности технологического процесса утилизации отходов животноводства с применением биогазовой установки проводились на экспериментальной площадке базовой кафедры «Инженерные системы ЖКХ» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, в г. Ижевске Удмуртской Республики, который отличается умеренно-континентальными климатическими условиями, характеризующимися длительной холодной зимой и непродолжительным теплым летом. Объектом исследования является технологический процесс в двухсекционном биогазовом реакторе.

На рисунке 2 показана конструкция биогазовой установки непрерывного действия для утилизации органических отходов.

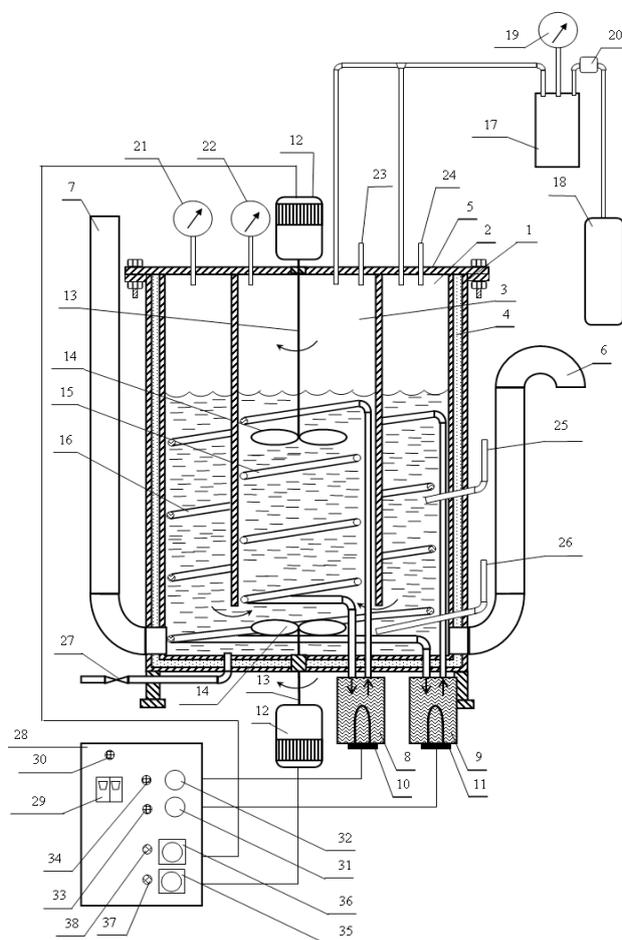


Рисунок 2 – Конструкция биогазовой установки непрерывного действия для утилизации органических отходов

Установка содержит двухсекционный биогазореактор 1: две сообщающиеся между собой кольцевые рабочие секции 2 и 3 в соответствии с двумя стадиями анаэробного сбраживания – мезофильной и термофильной. Объемы секций равны между собой. С целью снижения теплопотерь биогазореактор снабжен термоизоля-

цией 4 и выполнен по принципу стакан в стакане. Секции разделены перегородкой, имеющей цилиндрическую форму, и сообщаются между собой в нижней части биогазореактора, таким образом субстрат при загрузке перетекает из одной секции в другую. Биогазореактор имеет съемную крышку 5, которая крепится к корпусу установки болтовым соединением. Биомасса загружается через загрузочный трубопровод 6, а выгружается через разгрузочный трубопровод 7. Выходы трубопроводов выполнены выше уровня заполнения биомассой. Для подогрева биомассы в каждой секции смонтированы трубчатые радиаторы в виде змеевика 15 и 16 в мезофильной и термофильной секциях соответственно. Радиаторы заполнены водой, которая подогревается в расширительных камерах 8 и 9 при помощи электрических тэнов 10 и 11.

Перемешивание биомассы в секциях осуществляется перемешивающими устройствами, установленными вверху и внизу установки, состоящими из электродвигателя 12, приводного вала 13 и лопастной насадки 14. Полученный газ из секций поступает в смесительную камеру и далее в газгольдер 18. Смесительная камера снабжена контрольно-измерительными приборами – манометр 19 и газовый счетчик 20. Для контроля давления газа в секциях в крышке установки смонтированы манометры 21 и 22, а для контроля температуры – термометры 23, 24, 25, 26. Термометры 23, 25, 26 позволяют контролировать температуру непосредственно субстрата. В случае использования установки в качестве учебного стенда на дне установки смонтирован вентиль аварийного сброса воды 27, который также используется при запуске на холостом ходу установки и тарировке параметров технологического процесса анаэробного сбраживания. Управление установкой осуществляется при помощи пульта блока управления 28, на который выведены органы управления и световая сигнализация. На пульте блока управления расположены контактный коммутационный аппарат (автоматический выключатель) 29, световой индикатор «сеть» 30, регуляторы нагревающих устройств 31 и 32 для мезофильной и термофильной секций соответственно, световая индикация работы электрических тэнов системы подогрева 33 и 34, регуляторы перемешивающих устройств 35 и 36 для нижнего и верхнего соответственно, а также световая индикация работы этих устройств 37 и 38.

Исходная биомасса подается в загрузочный трубопровод. Биомасса попадает в ка-

меру биореактора, где происходит сбраживание исходной биомассы с образованием биогаза и высококачественных удобрений. Сбраживание происходит при мезофильном режиме и температуре органической биомассы 30–35 °С, при термофильном режиме и температуре 50–55 °С при помощи дополнительного обогрева теплообменником. Заливка системы теплоносителя осуществляется через расширительный бачок. Привод каждого из двух устройств для перемешивания сбраживаемой биомассы лопастной мешалкой осуществляется от электродвигателя. Перемешивающие устройства (лопастные мешалки) осуществляют зигзагообразное движение биомассы вверх и вниз, тем самым способствуют интенсификации процесса сбраживания. Образующийся в результате сбраживания биогаз поступает в газгольдер, затем газовая смесь подается на очистку в установку для комплексной подготовки газа. Расположенные на разной высоте загрузочный люк и люк выгрузки позволяют создать гидростатический подпор для выталкивания готовой продукции (рис. 3).



Рисунок 3 – Конструкция биогазовой установки для утилизации отходов животноводства

Предметом исследования являются теплообменные процессы и режимы анаэробного сбраживания, происходящие в биореакторе.

Опыты проведены в июне 2023 г., исследования проводились 15 дней. Согласно методике исследований, технологический процесс предусматривает добавление активатора процесса анаэробного сбраживания марки «Байкал ЭМ-1» для увеличения скорости сбражи-

вания отходов животноводства и интенсификации процесса в биореакторе. В период опыта в биореактор загружали свежий навоз КРС в объеме 60 кг и 20 л уплотненного активного ила, добавили активатор процесса в количестве 500 мл. В состав активатора процесса входят: молочнокислые, фотосинтезирующие бактерии; бактерии, фиксирующие азот; сахаромицеты; культуральная жидкость. Технологический процесс предусматривает мезофильный режим сбраживания в течение 5 суток в температурном диапазоне 30–35 °С. Термофильный режим сбраживания предусматривает продолжительность опыта в течение 10 суток при температуре 50–53 °С.

Объем выработанного биогаза в период проведения опыта фиксировали с помощью газоанализатора марки «ХОББИТ-Т». Для определения состава биомассы применены микробиологический и химический методы, использованы методики: определение острой и хронической токсичности, влажности, плотности, pH, общего азота, массовой доли общего фосфора, тяжелых металлов и органического вещества в отходах животноводства.

Результаты исследований и обсуждение. Экспериментальные исследования проводились при мезофильном и термофильном режимах анаэробного сбраживания. По результатам эксперимента проведены анализы исследуемой пробы биомассы в лаборатории биотехнологий (рис. 4).



Рисунок 4 – Проведение анализа по определению активной реакции среды pH

Согласно методикам определения влажности, плотности и pH загружаемого субстра-

та, отходов животноводства и исследуемой биомассы были проведены анализы и получены следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1 – Динамика изменения влажности, плотности и кислотности исследуемой биомассы

| Показатель | Загружаемый навоз КРС | Полученная биомасса |
|------------|-----------------------|---------------------|
| Влажность | 94,1±4,9 % | 89,1±4,9 % |
| Плотность | 0,97 % | 0,95 % |
| pH | 6,2 ед. | 6,5 ед. |

Анализ результатов, представленный в таблице 1, свидетельствует, что влажность и плотность в процессе анаэробного сбраживания уменьшились, что соответствует нормальной работе биореактора. За счет исключения небольшого количества лишней воды из технологического процесса конструкция биореактора разработана значительно меньшего объема, и данные конструктивные особенности позволяют существенно снизить затраты на строительство, повысить объем вырабаты-

ваемого биогаза и достичь эффективности работы метантенка [7]. Показатель активной реакции среды pH увеличился, но остается в пределах нормы жизнедеятельности метанообразующих бактерий, необходимых для оптимального технологического процесса анаэробного сбраживания.

Сравнительная характеристика показателей выработки биогаза в зависимости от времени и режимов сбраживания, мезофильного и термофильного, представлена в таблице 2.

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленный в таблице 2, свидетельствует, что оптимальная продолжительность процесса анаэробного сбраживания отходов животноводства в биореакторе объемом 0,8 м³ при добавлении активатора процесса в условиях термофильного режима работы биогазовой установки составила 10 дней, и оптимальная концентрация биогаза достигла показателя 5,78 %. Результаты экспериментальных исследований анаэробного сбраживания отходов животноводства в биореакторе на 9-й день представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика показателей выработки биогаза по дням эксперимента в зависимости от режимов сбраживания

| День опыта | t, час | Показания манометров, кг/см ² | | | Показания термометров, °С | | | Показания газоанализатора, % | Режим перемешивания, 1–4 |
|------------|--------|--|---|---|---------------------------|----|------|------------------------------|--------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | СН ₄ | |
| 1 | 15:00 | - | - | - | 34 | 30 | 35 | 1,99 | 2 |
| 2 | 12:00 | 0 | 0 | 0 | 31 | 29 | 32 | 3,07 | 2 |
| 3 | 14:00 | 0 | 0 | 0 | 35 | 32 | 35 | 4,46 | 2 |
| 4 | 14:00 | 0 | 0 | 0 | 35 | 31 | 33 | 3,40 | 2 |
| 5 | 16:00 | 0 | 0 | 0 | 36 | 34 | 36 | 4,46 | 2 |
| 6 | 14:00 | 0 | 0 | 0 | 44 | 35 | 40,5 | 4,28 | 2 |
| 7 | 14:00 | 0 | 0 | 0 | 44 | 36 | 40 | 5,21 | 2 |
| 8 | 10:00 | 0 | 0 | 0 | 41 | 36 | 35 | 5,72 | 2 |
| 9 | 10:00 | 0 | 0 | 0 | 42 | 35 | 35 | 5,78 | 2 |
| 10 | 10:00 | 0 | 0 | 0 | 41 | 35 | 42 | 5,63 | 2 |

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований анаэробного сбраживания отходов животноводства в биореакторе на 9-й день опыта

| № опыта | t, час | Показания манометров, кг/см ² | | | Показания термометров, °С | | | Показания газоанализатора, % | | Режим перемешивания, 1–4 |
|---------|--------|--|---|---|---------------------------|----|----|------------------------------|-----------------|--------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | СН ₄ | СО ₂ | |
| 1 | 09:00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 10:00 | 0 | 0 | 0 | 37 | 32 | 33 | 3,92 | 12,5 | 2 |
| 3 | 11:00 | 0 | 0 | 0 | 38 | 32 | 36 | - | - | 2 |
| 4 | 12:00 | 0 | 0 | 0 | 40 | 32 | 37 | 5,59 | 6,8 | 2 |
| 5 | 13:00 | 0 | 0 | 0 | 43 | 34 | 41 | - | - | 2 |
| 6 | 14:00 | 0 | 0 | 0 | 44 | 35 | 42 | 5,78 | 4 | 2 |
| 7 | 15:00 | 0 | 0 | 0 | 45 | 36 | 44 | - | - | 2 |
| 8 | 16:00 | 0 | 0 | 0 | 46 | 37 | 47 | 5,18 | 5,1 | 2 |

Для интенсификации процесса сбраживания рекомендуется перемешивать биомассу. При мезофильном режиме сбраживания и температуре от 30 до 35 °С, загрузке субстрата 80 кг и перемешивании 5 раз в сутки процесс сбраживания длится 5 суток. При термофильном режиме сбраживания и температуре от 50 до 55 °С, загрузке субстрата 80 кг и перемешивании 8 раз в сутки процесс сбраживания длится 10 суток.

Как следует из анализа экспериментального исследования, представленного в таблице 2, выработка биогаза при мезофильном режиме значительно ниже, чем при термофильном. Более интенсивная выработка биогаза при термофильном режиме свидетельствует о высокой активности бактерий в период анаэробного сбраживания при добавлении активатора процесса. Следовательно, для повышения эффективности функционирования биореактора возможно объединение мезофильной и термофильной стадий в единый цикл на биогазовой установке [12, 13].

В таблице 4 представлены сравнительные характеристики режимов анаэробного сбраживания разработанной трехстадийной технологии на биогазовой установке непрерывного действия.

Таблица 4 – Сравнительные характеристики режимов анаэробного сбраживания разработанной трехстадийной технологии на биогазовой установке

| Показатели процесса | Режимы анаэробного сбраживания | | |
|--|--------------------------------|-------------|--------------|
| | психрофильный | мезофильный | термофильный |
| Активная реакция среды | 6,2 | 6,5 | 6,9 |
| Температурный диапазон сбраживания, °С | 8...20 | 20...40 | 40...60 |
| Продолжительность сбраживания (среднее), дней | 16 | 5–7 | 8–10 |
| Влажность, % | 94,1 | 92,3 | 89,1 |
| Оптимальная температура обработки субстрата, °С | +16...+20 | +33...+35 | +53...+55 |
| Концентрация активатора процесса на 100 кг биомассы, мл | 100 | 100 | 100 |
| Скорость перемешивания, об/мин | - | 1...4 | 1...3 |
| Режим перемешивания, в зависимости от количества перемешиваний в сутки | - | 6 | 4 |

В таблице 5 представлены показатели технико-экономической эффективности разработанной трехстадийной технологии анаэробного сбраживания на биогазовой установке непрерывного действия.

Таблица 5 – Технико-экономические показатели эффективности, разработанной трехстадийной технологии анаэробного сбраживания на биогазовой установке

| Показатели процесса | Численные значения |
|--|--------------------|
| Средняя продолжительность процесса в течение опытов, дней | 18 |
| Оптимальная продолжительность процесса анаэробного сбраживания (опыта), дней | 15 |
| Объем биомассы, отходов животноводства, навоз КРС с влажностью 94 %, кг | 80 |
| Количество активатора процесса, мл | 250 |
| Объем органического удобрения, биогумуса, получаемого в результате сбраживания отходов животноводства, навоза КРС в течение опыта, кг | 76 |
| Стойловый период для климатических условий Удмуртской Республики, дней | 210 |
| Объем органического удобрения, биогумуса, получаемого в результате сбраживания отходов животноводства, навоза КРС в течение стойлового периода, кг | 532 |
| Стоимость органического удобрения, биогумуса (1 л), руб. | 25 |
| Стоимость почвогрунта (1 л), руб. | 9 |
| Стоимость компоста (1 кг), руб. | 6,50 |
| Получаемый доход при продаже органического удобрения, биогумуса, руб. | 26 600 |
| Получаемый доход при продаже почвогрунта в день, руб. | 9603–10 476 |
| Получаемый доход при продаже компоста в день, руб. | 6935,50–7566,00 |
| Срок окупаемости для биогазовой установки в АПК, год | 3,9 |
| Годовой экономический эффект от внедрения биогазовой установки для АПК, руб. | 25 802 |

Стоимость изготовления биореактора в Удмуртской Республике учитывает капитальные затраты на комплектующие и сборку конструкции биогазовой установки на 01.05.2024 г. В таблице 6 представлены сравнительные показатели стоимости изготовления биореактора различными производителями [14, 15].

Таблица 6 – Сравнительные показатели стоимости изготовления биореактора

| Предприятия, которые могут изготовить биореактор объемом загрузки биомассы от 50 до 500 л в сутки | Стоимость оборудования, руб. |
|--|------------------------------|
| Экспериментальный биореактор, г. Ижевск (транспортные, пусконаладочные и эксплуатационные расходы не учтены) | 81 000 |
| АО «Рассвет», г. Вологда (транспортные, пусконаладочные и эксплуатационные расходы не учтены) | 132 000 |
| Ассоциация предприятий БМП, производство биокомплекса, применяемого для утилизации отходов животноводства, г. Вологда (транспортные, пусконаладочные и эксплуатационные расходы не учтены) | 89 000–770 000 |
| Завод строительного оборудования, г. Тула (транспортные, пусконаладочные и эксплуатационные расходы не учтены) | 500 000 |
| ООО «ЦентрИнвестПроект», производство реакторов Биорекс, г. Москва (транспортные, пусконаладочные и эксплуатационные расходы не учтены) | 550 000 |
| Биотехнологическая компания Шанхай Байлунь (BL-BIO), комплексная поставка и техническое обслуживание биореакторов, г. Шанхай | 10 000 000 |

При внедрении экспериментальной биогазовой установки на предприятиях АПК годовой экономический эффект от применения энергоэффективной трехстадийной технологии анаэробного сбраживания отходов животноводства и использования биогазовой установки в технологическом процессе обработки отходов составит 25 802 руб., срок окупаемости проекта 3,9 года. Биогазовую установку рекомендовано изготавливать из коррозионностойкой жаропрочной нержавеющей стали марки 10X18H10T.

Выводы:

1. Разработана трехстадийная технология анаэробного сбраживания отходов животноводства с применением активатора в периодических мезофильном, термофильном режимах работы с учетом температурного диапазона в биореакторе, обеспечивающая интенсификацию процесса. Использование мезофильного режима анаэробного сбраживания позволяет уменьшить затраты на нагрев субстрата и приводит к снижению эффективности обеззараживания биомассы. Применение термофильного режима требует подведения наибольшего теп-

ла и увеличения температуры от 50 до 55 °С, что способствует ферментации отходов животноводства и повышению эффективности обеззараживания биомассы. При термофильном режиме сбраживания отходов животноводства и активного ила в период проведения опыта на 9-й день наблюдали максимальную выработку биогаза 5,78 %.

2. Разработано новое техническое устройство (биореактор), которое позволяет интенсифицировать процесс анаэробного сбраживания отходов животноводства для получения органического удобрения, почвогрунта, компоста и выработки биогаза. Оптимальными конструктивными особенностями биогазовой установки являются перемешивающие устройства, установленные сверху и снизу в биореакторе. Перемешивающее устройство, установленное снизу, позволяет перемешивать субстрат, предотвращая оседание взвешенных частиц. Перемешивающее устройство, установленное сверху, позволяет перемешивать субстрат, предотвращая образование корки. Также биогазовая установка имеет теплоизоляционный слой для уменьшения теплопотерь, так как корпус выполнен из нержавеющей стали для повышения энергоэффективности проекта.

3. Разработанная трехстадийная технология анаэробного сбраживания отходов животноводства в биореакторе обеспечивает энергоэффективность, экологичность и экономичность проекта, возможность получения почвогрунта, компоста и биогаза. Оценка эффективности проекта от сокращения сроков строительства и определения оптимальных конструктивных особенностей биогазовой установки при ее изготовлении выполнена на основании проведенного анализа международных и российских технологий анаэробного сбраживания отходов животноводства и оборудования при экономическом расчете проектных решений. Стоимость изготовления биореактора в 5 раз дешевле российских и зарубежных аналогов. Внедрение биогазовых установок на предприятиях АПК в Удмуртской Республике позволит получить годовой экономический эффект в размере 25 802 руб. для крестьянско-фермерского хозяйства с содержанием 10 голов КРС при применении энергоэффективной трехстадийной технологии анаэробного сбраживания отходов животноводства и использования биогазовой установки в технологическом процессе обработки отходов, срок окупаемости проекта составит 3,9 года.

Сведения о финансировании. Исследования проводились в рамках Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова «Научное обоснование технологии утилизации отходов животноводства и осадков сточных вод в едином цикле на биогазовой установке» (шифр ПМВ-24), приказ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» от 27.12.2023 г. № 1565.

Список источников

1. Абрамова А. А., Исаков В. Г., Непогодин А. М. Зеленые технологии в очистке поверхностных и сточных вод объектов ЖКХ // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования: материалы VIII Международной конференции. В 2 т. Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 1. С. 460–465.

2. Безбородова О. Е. Комплексная утилизация сточных вод предприятий. Москва: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 с.

3. Биогазовая установка с активной системой перемещения сбраживаемой массы / С. П. Игнатев, Н. Ю. Касаткина, А. А. Литвинюк [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 180. С. 61–71.

4. Благоразумова А. М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод. Санкт-Петербург: Лань. 2021. 208 с.

5. Волкова А. А., Шишкунов В. Г. Системный анализ и моделирование процессов в техносфере. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2019. 244 с.

6. Метод сравнительной оценки тепловых потерь биореакторов на этапе аванпроекта биогазовой установки / В. Н. Диденко, М. В. Свалова, А. В. Исаев, Н. Д. Узаков // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 5 (121). С. 61–65.

7. Оковитая К. О. Повышение эффективности работы метантенков // Эффективные технологии в области водоподготовки и очистки в системах водоснабжения и водоотведения. 2021. С. 54–56.

8. Оценка загрязненности городских сточных вод антибиотическими препаратами цефалоспориновой группы и возможности их определения спектрофотометрическим методом / А. А. Абрамова, А. М. Батуева, А. В. Васильев [и др.] // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2021. № 2. С. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05.

9. Провоторова А. А. Сравнительный анализ использования азотенков и метантенков при очистке сточных вод // Современная наука и ее ресурсное обеспечение: инновационная парадигма: сборник статей по материалам VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 97–102.

10. Смирнова А. Р. Пути повышения эффективности работы метантенков // Научный форум: технические и физико-математические науки: сбор-

ник статей по материалам XXXI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 23–30.

11. Суворова Е. В., Микрюкова Е. М. Преодоление проблем с очисткой сточных вод от плотных эмульсий в нефтеперерабатывающей промышленности // Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020: материалы V Международной (XI Всероссийской) конференции. Чебоксары. 2020. С. 415–422.

12. Таскаев М. В., Гарифьянова Л. А., Свалова М. В. Анализ конструкции метантенков для обработки осадка с очистных сооружений // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. № 1. С. 96–105.

13. Юхин Д. П. К вопросу повышения эффективности функционирования метантенка биогазовой установки // Наука молодых – инновационному развитию АПК: материалы XII Национальной научно-практической конференции молодых ученых. 2019. С. 168–172.

14. Baowei Wang, Zhiwen Wang, Tao Chen, Xueming Zhao. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators // Front Bioeng. Biotechnol. Sec. Bioprocess Engineering. 2020: 15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00007>.

15. Kasatkin V. V., Kasatkina N. Y., Ignatyev S. P., Litvinyuk A. A. Recycling of animal waste // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Scientific and Practical Conference: Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad, DAICRA 2021" 2022. S. 012112.

16. Nilgün Balkaya, Ercan Erkan. Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge. Desalination and Water Treatment. 2019; 17: 61-69.

References

1. Abramova A. A., Isakov V. G., Nepogodin A. M. Zelenye tekhnologii v ochistke poverhnostnyh i stochnyh vod ob'ektov ZHKKH // Tekhnicheskie universitety: integraciya s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovaniya: materialy VIII Mezhdunarodnoj konferencii. V 2 t. Izhevsk: IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2019. T. 1. S. 460–465.

2. Bezborodova O. E. Kompleksnaya utilizaciya stochnyh vod predpriyatij. Moskva: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 s.

3. Biogazovaya ustanovka s aktivnoj sistemoj peremeshcheniya sbrazhivaemoj massy / S. P. Ignat'ev, N. Yu. Kasatkina, A. A. Litvinyuk [i dr.] // Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 180. S. 61–71.

4. Blagorazumova A. M. Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskih stochnyh vod. Sankt-Peterburg: Lan'. 2021. 208 s.

5. Volkova A. A., Shishkunov V. G. Sistemnyj analiz i modelirovanie processov v tekhnosfere. Ekaterinburg: Ural. un-t, 2019. 244 s.

6. Metod sravnitel'noj ocenki teplovyh poter' bioreaktorov na etape avanproekta biogazovoj ustanovki

/ V. N. Didenko, M. V. Svalova, A. V. Isaev, N. D. Uzakov // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2019. № 5 (121). S. 61–65.

7. Okovitaya K. O. Povyshenie effektivnosti raboty metantenkov // Effektivnye tekhnologii v oblasti vodopodgotovki i oчитskii v sistemah vodosnabzheniya i vodootvedeniya. 2021. S. 54–56.

8. Ocenka zagryaznennosti gorodskih stochnyh vod antibioticheskimi preparatami cefalosporinovoy gruppy i vozmozhnosti ih opredeleniya spektrofotometricheskim metodom / A. A. Abramova, A. M. Batueva, A. V. Vasil'ev [i dr.] // Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2021. № 2. S. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05.

9. Provotorova A. A. Sravnitel'nyj analiz ispol'zovaniya aerotנקov i metantenkov pri oчитskke stochnyh vod // Sovremennaya nauka i ee resursnoe obespechenie: innovacionnaya paradigma: sbornik statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2021. S. 97–102.

10. Smirnova A. R. Puti povyshenii effektivnosti raboty metantenkov // Nauchnyj forum: tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki: sbornik statej po materialam XXXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2020. S. 23–30.

11. Suvorova E. V., Mikryukova E. M. Preodolenie problem s oчитskoj stochnyh vod ot plotnyh emul'sij v neftepererabatyvayushchej promyshlennosti

// Stroitel'stvo i zastrojka: zhiznennyj cikl – 2020: materialy V Mezhdunarodnoj (XI Vserossijskoj) konferencii. Cheboksary. 2020. S. 415–422.

12. Taskaev M. V., Garifyanova L. A., Svalova M. V. Analiz konstrukcii metantenkov dlya obrabotki osadka s oчитsnyh sooruzhenij // Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2022. № 1. S. 96–105.

13. Yuhin D. P. K voprosu povysheniya effektivnosti funkcionirovaniya metantenka biogazovoy ustanovki // Nauka molodyh – innovacionnomu razvitiyu APK: materialy XII Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh. 2019. S. 168–172.

14. Baowei Wang, Zhiwen Wang, Tao Chen, Xueming Zhao. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators // Front Bioeng. Biotechnol. Sec. Bioprocess Engineering. 2020: 15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00007>.

15. Kasatkin V. V., Kasatkina N. Y., Ignatyev S. P., Litvinyuk A. A. Recycling of animal waste // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Scientific and Practical Conference: Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad, DAICRA 2021" 2022. S. 012112.

16. Nilgün Balkaya, Ercan Erkan. Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge. Desalination and Water Treatment. 2019; 17: 61-69.

Сведения об авторах:

М. В. Паршикова¹✉, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0009-0001-4151-8119>;

С. Г. Паршиков², магистр, <https://orcid.org/0009-0003-9477-3935>;

В. В. Касаткин³, студент, <https://orcid.org/0009-0008-2132-2558>;

Н. Ю. Касаткина⁴, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6010-3894>;

В. В. Касаткин⁵✉, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1224-8893>

^{1,2,3}ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, ул. Студенческая, 42, Ижевск, Россия, 426069

^{4,5}Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 9, Ижевск, Россия, 426069

¹marianna.svalova@yandex.ru

⁵kasww@mail.ru

Original article

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES AND OPERATION MODES OF THE BIOGAS PLANT

Marianna V. Parshikova¹✉, **Stanislav G. Parshikov**², **Vladimir V. Kasatkin**³, **Nadezhda Yu. Kasatkina**⁴, **Vladimir V. Kasatkin**⁵✉

^{1,2,3}Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

^{4,5}Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

¹marianna.svalova@yandex.ru

⁵kasww@mail.ru

Abstract. *The research purpose is to analyze the design features and operating modes of a biogas plant to increase the efficiency of the technological process of animal waste disposal. The research was carried out at the experimental site of the basic Department of Engineering Systems of Housing and Communal Services of Kalashnikov ISTU in 2023. The design of a two-section bioreactor and a general scheme of the operation stages of a biogas plant were developed. The technological process involved combining two modes of anaerobic fermentation into a*

single cycle – mesophilic and thermophilic. The mesophilic mode assumed the duration of the experiment for 5 days in the temperature range 30–35 °C, the thermophilic mode – for 10 days at the temperature of 50–53 °C, which was achieved by additional heating with a heat exchanger. The biogas formed as a result of fermentation enters the gas tank, and then the gas mixture is supplied for purification to the installation for complex gas treatment. An analysis of the results of experimental studies indicates that the optimal duration of the process of anaerobic fermentation of livestock waste in a 0.8 m³ bioreactor with the addition of a process activator in the thermophilic operation mode of a biogas plant was 10 days, the optimal concentration of biogas reached 5.78 %. The introduction of biogas plants at agricultural enterprises in the Udmurt Republic will allow to obtain an annual economic effect in the amount of 25,802 rubles for a peasant farm with 10 heads of cattle, using an energy-efficient three-stage technology for anaerobic fermentation of livestock waste and using a biogas plant in the waste treatment process, the payback period of the project will be 3.9 years.

Key words: biogas plant, mesophilic fermentation mode, thermophilic fermentation mode.

For citation: Parshikova M. V., Parshikov S. G., Kasatkin V. V., Kasatkina N. Yu., Kasatkin V. V. Analysis of design features and operation modes of the biogas plant. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2024; 3(79): 128-137. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_3_128-137.

Authors:

M. V. Parshikova¹✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0009-0001-4151-8119>;

S. G. Parshikov², Master, <https://orcid.org/0009-0003-9477-3935>;

V. V. Kasatkin³, student, <https://orcid.org/0009-0008-2132-2558>;

N. Yu. Kasatkina⁴, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6010-3894>;

V. V. Kasatkin⁵✉, Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1224-8893>

^{1,2,3}Kalashnikov ISTU, 42 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

^{4,5}Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

¹marianna.svalova@yandex.ru

⁵kasww@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 13.07.2024;

принята к публикации 06.09.2024.

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 13.07.2024; accepted for publication 06.09.2024.