

УДК 628.336.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-23-29

Разработка модели автоматизированного управления технологическим процессом анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе

М. В. Паршикова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены результаты исследований и моделирования процессов, проведенных на экспериментальной площадке кафедры «Водоснабжение и водоподготовка» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. Целью исследований является разработка модели автоматизации рабочих процессов в биогазовой установке анаэробного сбраживания на основе анализа измеряемых параметров. Предложена система автоматизации управления технологических процессов биореактора с применением исполнительных механизмов и управляемых многопараметрических интеллектуальных датчиков, имеющих возможность обмена данными с карманным персональным компьютером (смартфон) посредством беспроводной связи. В статье представлена общая архитектура многопараметрических интеллектуальных датчиков и совместимых исполнительных механизмов, применяемых в мониторинге и управлении технологическим процессом в биореакторе. В статье представлена базовая архитектура интеллектуального многопараметрического датчика для биореактора. Представлены результаты исследований и структурная схема разработанной двухсекционной биогазовой установки с полув автоматической системой управления, содержащей независимые перемеживающие устройства для каждой секции, независимые системы жидкостного подогрева субстрата для каждой секции, электрический пульт управления и контроля значимых факторов процесса. В статье рассмотрен сравнительный анализ технологических процессов утилизации органических отходов и представлены функциональные схемы автоматизации работы биореактора применительно к климатическим условиям Удмуртской Республики, данные исследования проводились на основании литературных источников. Рассмотрены принципиальные схемы подключения датчиков к фиксирующим устройствам, которые дают возможность оператору управлять технологическим процессом утилизации органических отходов с регулированием температуры в биореакторе. Автоматизация технологического процесса анаэробного сбраживания органических отходов в биореакторе позволит увеличить объем выработанного биогаза и повысить энергоэффективность метода.

Ключевые слова: биореактор, многопараметрический интеллектуальный датчик, модель автоматизации, осадок сточных вод, система автоматического регулирования.

Введение

Сточные воды, отводимые с различных объектов коммунального хозяйства, по своему составу разделяются на три вида: производственные, бытовые и ливневые. Состав и степень загрязненности производственных сточных вод весьма разнообразны и зависят главным образом от характера производства и условий использования воды в технологических процессах. В бытовых сточных водах наблюдается однородность состава, где концентрация загрязнений зависит от нормы водопотребления. Количество и качество сточных вод меняется в значительных пределах в зависимости от климатических условий, географических условий, рельефа местности, характера застройки и уровня развития города, наличия и деятельности предприятий, которые располагаются в пределах населенных пунктов.

Независимо от вида сточных вод, для возврата в природную среду они должны подвергаться очистке от разнообразных загрязнений. В процессе их очистки образуются осадки сточных вод, различные по химическому составу и физическим свойствам. Современные технологии стабилизации и обезвоживания осадков сточных вод позволяют на порядок сократить их объемы, однако дорогостоящее оборудование и загрязнение атмосферы, как следствие применения некоторых технологий, требуют более глубокого изучения рабочих процессов утилизации.

Для уменьшения объемов накопленных осадков сточных вод и улучшения качества окружающей природной среды необходимо разрабатывать новые рациональные и экологически безопасные технологии утилизации органических отходов. В качестве одной из таких технологий исследуется переработка осадков сточных вод с применением биореактора, обрабатывающего вторичное сырье, с использованием последнего в качестве составляющего компонента для получения почвогрунта и биогаза.

На сегодняшний день производство биогаза является одной из самых распространенных отраслей промышленности. За рубежом биогазовые установки производят не только тепло и электричество, но также почвогрунт и топливо для автомобилей, заменяющее бензин и дизель. Товарный биогаз обладает теми же характеристиками, что и природный газ. Поэтому его можно применять в автомобилях, двигатель которых приспособлен под природный газ. В России, а конкретно для климатических условий Удмуртской Республики, производство биогаза в качестве топлива является актуальной задачей.

Для очистных сооружений канализации водоканалов Удмуртской Республики проблема утилизации осадка сточных вод актуальна, так как метантенки на очистных станциях законсервированы. На сегодняшний день иловые площадки переполнены для приема отработанного ила. Поэтому применение биогазовых технологий и уменьшения объемов накопленных осадков сточных вод с последующей переработкой во вторичное сырье для водоканалов Удмуртской Республики является суровой необходимостью [1–3].

Для оптимизации метода утилизации органических отходов разработана модель автоматизированной системы управления технологическим процессом в биореакторе. Значимые факторы технологического процесса учитываются при разработке модели автоматизированного управления трехстадийной технологией утилизации органических отходов. В производственный процесс очистных сооружений городов, населенных пунктов и предприятий АПК требуется внедрение автоматизированных систем управления с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности коммунального и сельского хозяйства. Автоматизированная система управления позволяет контролировать технологический процесс анаэробного сбраживания органических отходов и управлять режимами работы биореактора [4, 5].

В системе управления очистных станций канализации городов, населенных пунктов и очистных сооружений перерабатывающих предприятий АПК страны циркулирует большой поток разнообразных данных, содержащих сведения о технических параметрах работы устройств и механизмов. Этот поток проходит разные уровни управления от предприятия до головных органов управления системами. Документы и сообщения весьма разнообразны по характеру и содержанию. При разработке и внедрении АСУ (автоматизированной системы управления) весьма важным является установление рациональных информационных взаимосвязей между отдельными частями системы по структуре нормативной базы по потокам информации и решаемым задачам. В этой связи одной из важнейших проблем эффективной организации и целенаправленного управления в АСУ является своевременный сбор и переработка действительно первичной информации, которая возникает в момент заполнения различного рода материально-технической и отчетной документации. Задача определения состава этой первичной информации может быть решена однозначно и оптимальным образом только при известных критериях и алгоритмах ее обработки для выдачи управляющих решений. Существенные переменные алгоритмов управления по выбранным критериям, необходимые параметры контроля ограничителей и затрат производства будут обуславливать тот объем информации, который явится исходным для информационной схемы коммунального и сельского хозяйства и достаточным для правильной работы АСУ. Для реализации отмеченного положения в области рационального сбора, обработки, поиска и выдачи информации на всех ступенях иерархии АСУ необходимо разработать единую технологическую линию сбора, обработки и выдачи информации. При этом следует автоматизировать данные процессы. Единые системы должны обеспечить однозначность сообщений, и в первую очередь нормативно-технической документации на всех уровнях ее обращения. Приспособленная для автоматизированной обработки и содержащая минимально необходимую информацию документация должна быть переведенной на единый для АСУ информационный язык [6–9].

Целью исследования является разработка модели автоматизации рабочих процессов в биогазовой установке анаэробного сбраживания на основе анализа измеряемых параметров.

Материалы и методы. Разработка модели автоматизированного управления технологическим процессом обработки осадков сточных вод в биореакторе

Рассматривая различные отрасли очистных станций канализации городов, населенных пунктов и очистных сооружений перерабатывающих предприятий АПК, как объекты автоматизированного контроля и управления с помощью методов теорий исследования операций, теории информации и математического моделирования, необходимо разработать оптимальные структурные модели информационных систем сбора, передачи, обработки и выдачи информации, реализовать задачу построения и анализа моделей информационных потоков и выработки решений по регулирующим воздействиям с целью повышения эффективности функционирования АСУ в целом. Разработать информационную модель управления производственными и технологическими процессами очистных сооружений в комплексе и частных моделей по отдельным сооружениям и уровням данного управления. В процессе разработки рассматриваются различные варианты этих моделей и выбираются такие, от которых ожидается получение практических рекомендаций к улучшению процессов анализа и синтеза отдельных частей информационного обеспечения АСУ, унификации и разумного сокращения наборов данных, упорядочения потоков информации, сокращения излишних линий связи, оптимизации структуры информационных каналов и сообщений. Разработанные информа-

ционные модели, представляющие собой технологические линии сбора, передачи, обработки и выдачи информации, должны в дальнейшем явиться исходным положением к обоснованию применения на различных уровнях управления средств вычислительной техники, что обеспечит в результате автоматизацию процесса управления системой.

Модель автоматизированного управления технологическим процессом обработки осадков сточных вод была реализована при разработке двухсекционной биогазовой установке с полуавтоматической системой управления.

В биогазовой установке, представленной на рис. 1, реализована система автоматического регулирования, предназначенная для поддержания регулируемой величины температуры в определенном, заданном интервале для мезофильного и термофильного режима. В модуле управления биореактором, представленном на рис. 2, автоматическое регулирование температуры может быть представлено автоматическим управлением. Усовершенствован модуль управления биореактором с применением системы автоматического регулирования (САР) с регулированием по температуре.



Рис. 1. Экспериментальная биогазовая установка

Fig. 1. Experimental biogas plant



Рис. 2. Модуль управления биореактором

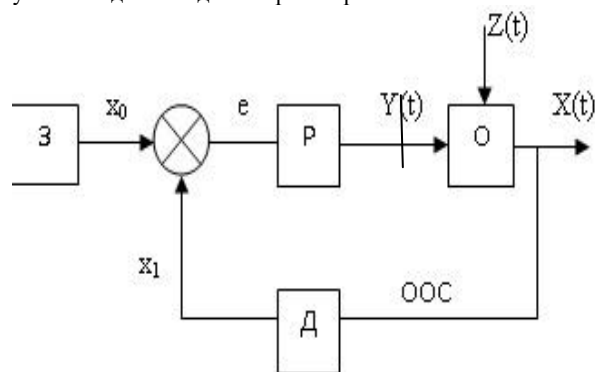
Fig. 2. Bioreactor Control Module

Для оптимизации метода утилизации органических отходов разработана модель автоматизированной системы управления технологическим процессом в биогазовой установке.

Значимые факторы технологического процесса, такие как температура в секциях, влажность, давление, концентрация органических отходов, режим перемешивания, кислотность среды, учитываются при разработке модели автоматизированного управления трехстадийной технологией утилизации органических отходов в биореакторе [10, 11]. В зависимости от требуемых факторов подбирается

конструкция одного многопараметрического интеллектуального датчика, заменяющего множество одиночных датчиков.

В биогазовой установке система автоматического регулирования предназначена для поддержания регулируемой величины температуры в определенном, заданном интервале для мезофильного и термофильного режима. В модуле управления биореактором регулирование температуры может быть реализовано с помощью автоматического управления. Усовершенствовать модуль управления биореактором возможно с применением системы автоматического регулирования (САР) с регулированием по температуре. Одним из значимых факторов анаэробного сбраживания является температура, так как поддержание его оптимального значения необходимо для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов, обеспечивающих более полную и качественную обработку биомассы. Для стабильности данного параметра необходимо применять систему автоматического регулирования. Упрощенная функциональная схема САР представлена на рис. 3 [12–14]. На основании типовой схемы САР предложена система автоматизации управлением технологического процесса с применением одного многопараметрического интеллектуального датчика для биореактора.



З – задачник для установки требуемого значения параметра X_0

Д – датчик для измерения текущего значения параметра X_1

Р – регулятор

О – объект регулирования

ООС – отрицательная обратная связь

$Z(t)$ – внешнее воздействие

$Y(t)$ – внутреннее воздействие

$X(t)$ – выходная величина

Рис. 3. Упрощенная функциональная схема САР с регулированием по температуре

Fig. 3. Simplified functional scheme of ATS with temperature control

Воздействия, приложенные к элементам системы управления технологическим процессом анаэробного сбраживания, разделены на внешние $Z(t)$ и внутренние $Y(t)$. Внешние воздействия $Z(t)$ в технологическом процессе анаэробного сбраживания разделены на возмущающие и задающие. К возмущающим воздействиям, приложенным к объекту регулирования можно отнести теплопотери биореактора. К внешним воздействиям на систему автоматического регулирования относятся входные величины или значимые факторы, такие как температура, концентрация, скорость и режим перемешивания, активная реакция среды, влажность, время, давление [15–17].

В нашем случае объектом регулирования является биореактор. Выходная параметрическая величина $X(t)$ – температура биомассы не является постоянной во времени, т. к. присутствует внешнее воздействие $Z(t)$ – теплопотери самого биореактора. Контролером текущего значения температуры X_1 является датчик, передающий эту информацию вычислителю.

Вычислитель, принимая текущее значение параметра от датчика и установленное значение параметра X_0 от задачника, выдает команду на воздействие регулятору, который является теплоносителем. Если $e = X_1 - X_0 \neq 0$, то полученная ошибка и будет являться командой регулятору на совершение внутреннего воздействия [18–20].

Рассматриваемая экспериментальная биогазовая установка работает в полуавтоматическом режиме, т. е. требует присутствия оператора, в обязанности которого входит сбор информации показаний температурных датчиков, контроль давления и объема вырабатываемого биогаза. Принятие решения для отключения/включения системы подогрева с настройкой температурного режима, отключения/включения системы перемешивающих устройств с настройкой скорости вращения.

Фундаментальная концепция теоретических и экспериментальных исследований была положена в основу идеи двухсекционного биореактора непрерывного действия с автоматизированной системой управления рабочим процессом.

Под АСУ ТП, как правило, понимают комплексное решение, которое обеспечивает автоматизацию основных технологических операций в целом на производстве или каком-то его участке.

Автоматизированная система управления не является полностью автономной (самостоятельной) и требует участия человека (оператора) для реализации определенных задач.

В иностранной литературе к АСУ ТП обычно применяют термин Process Control Systems (PSC). АСУ ТП принято разделять на несколько классов, наиболее комплексным из них является PCU. PCU – распределенная система управления, в иностранной литературе DCS (Distributed Control System).

Как правило, большинство PCU, представленных на рис. 4, имеет трехуровневую модель построения. На нижнем уровне, располагаются полевые приборы (датчики, сенсоры, исполнительные механизмы), подключаемые с помощью электрических кабелей к системе полевого ввода/вывода ПЛК, являющегося элементом среднего уровня. ПЛК в иностранной литературе обозначается термином PLC (Programmable Logic Controller).

ПЛК, как правило, представлены вычислительными устройствами, изготовленными специально под конкретные системы, выполняют основные задачи по приему/передаче сигналов внутри сети, обработке собранной информации. Средний уровень связан с верхним уровнем посредством электрических кабелей.

Верхний уровень – это уровень операторского управления, состоит из персонального компьютера и служит для отображения технологической информации. Рассмотренная система управления имеет существенный недостаток в виде специально изготовляемого, под конкретное производство, ПЛК [20, 21].

Предложенная схема управления, представленная на рис. 3, позволяет использовать в качестве ПЛК обычный смартфон, тем самым данный недостаток будет устранен.

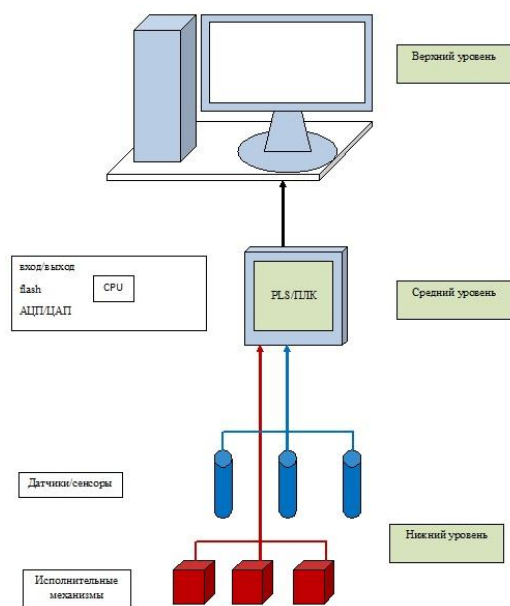


Рис. 4. Типовая схема распределенной системы управления

Fig. 4. Typical scheme of a distributed control system

Выполнив теоретические исследования в сфере инноваций в области микропроцессорной индустрии и ввиду необходимости полной автоматизации процесса предлагается применить один интеллектуальный многопараметрический датчик, объединяемый в единую организационную систему управления, с последующей интеграцией панели управления установкой в качестве блока исполнения.

Примером брендовых датчиков является многопараметрический анализатор AquaTROLL 500/600 от компании In-Situ. Измеряемый параметр: температура, pH/ОВП, мутность, твердые растворенные вещества. Выходной сигнал: RS485 / ModBus, SDI-12, Bluetooth. Выходной интерфейс: Android 4.4, требует Bluetooth 2.0.

На основании проведенных теоретических исследований предложена система автоматизации управлением технологического процесса с применением одного многопараметрического интеллектуального датчика для биореактора, предлагаемая система является оптимальной для биореакторов, в отличие от рассмотренной в литературном обзоре.

Результат исследований

Предлагаемая система автоматизации управлением технологического процесса с применением многопараметрического интеллектуального датчика и исполнительных механизмов, подключенных к центральному компьютеру посредством беспроводной связи, представлена на рис. 5.

Интеллектуальные многопараметрические датчики и совместимые исполнительные механизмы, применяемые в биореакторах, являются основными элементами FOCS и выполняют мониторинг параметров технологического процесса, обработку полученных сигналов, передачу данных и инструкции по запуску.

Общая архитектура многопараметрических интеллектуальных датчиков и совместимых исполнительных механизмов, применяемых в мониторинге и управлении технологическим процессом в биореакторе представлена на рис. 6.

Рассмотрим принцип работы многопараметрического интеллектуального датчика.

В блок сенсоров заключено несколько датчиков, по сути являющихся аналоговыми приборами, которые, реагируя на изменение заданных для них параметров, формируют аналоговые сигналы.

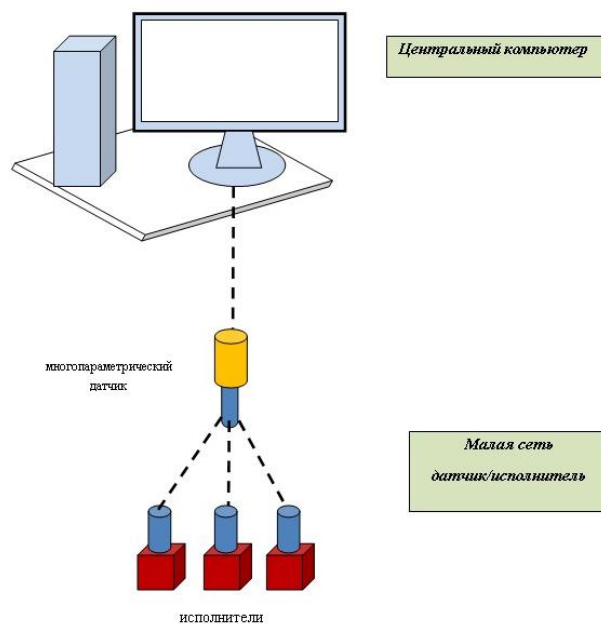


Рис. 5. Единая организационная система управления (FOCS)

Fig. 5. Unified Organizational Management System (FOCS)

Аналоговые сигналы принимает блок адаптер, который является интеллектуальным, т. к. содержит микропроцессор и встроенное ПО, преобразует их в форму цифровых сигналов с последующим вычислением согласно заданной программе.

Интеллектуальный блок адаптер принимает решение, нужно ли задействовать блок исполнитель. Если такая необходимость существует, то посредством беспроводной связи команда на включение исполнителя посылается на блок адаптер блока исполнителя. Полученный сигнал преобразуется в аналоговую форму и поступает на блок исполнителя, активируя его.

Один многопараметрический интеллектуальный датчик способен работать с несколькими исполнителями. Результат, если необходимо, передается на компьютер оператора посредством беспроводной связи.

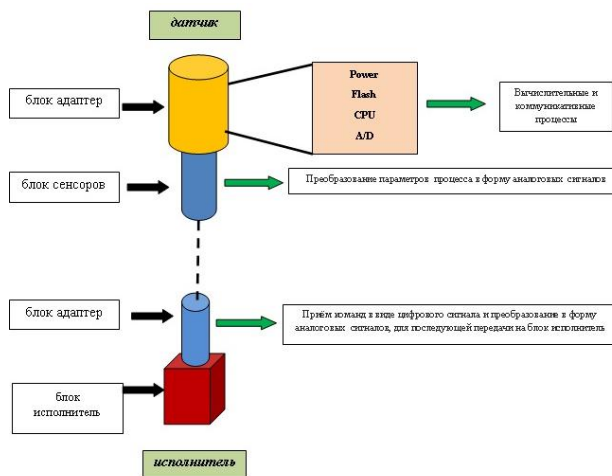


Рис. 6. Базовая архитектура интеллектуального датчика с исполнителем

Fig. 6. Basic architecture of an intelligent sensor with a performer

На рис. 7 представлена базовая архитектура интеллектуального многопараметрического датчика.

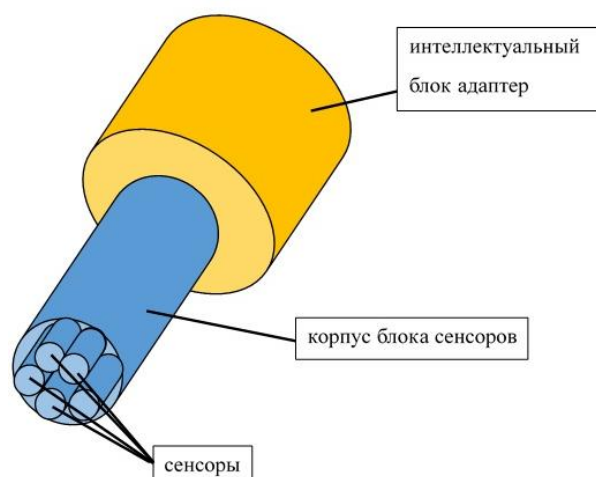


Рис. 7. Базовая архитектура многопараметрического интеллектуального датчика

Fig. 7. Basic architecture of a multiparametric intelligent sensor

Разработаны технические решения, обеспечивающие управление и автоматизацию технологическим процессом анаэробного сбраживания органических отходов в биореакторе для получения высокоэффективного органического удобрения, почвогрунта, компостов, позволяющие реализовать энергосберегающую технологию для биогазовых установок на очистных станциях канализации и для очистных сооружений АПК.

Выводы

1. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение системы автоматизации двухсекционного биореактора сокращает время обработки осадков сточных вод, повышает качество готового продукта. Соответствие агрохимическим показателям допускает его использование в качестве составляющего компонента для получения качественного удобрения, а с использованием соответствующей технологии получение чистого почвогрунта.

2. Предложенная модель автоматизированного управления на основе единой организационной системы управления с применением интеллектуального многопараметрического датчика, позволяющего упростить контроль за рабочими процессами, оптимизирует работу биореактора и усовершенствует качество конечного продукта.

3. Предложенное техническое решение по автоматизации технологическим процессом анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе для получения почвогрунта, компостов и биогаза сведет к минимуму влияние человеческого фактора (оператора установки), повысит уровень гигиенической среды на производственной площадке и увеличит объем вырабатываемого биогаза, что позволит реализовать энергосберегающую технологию для биогазовых установок на очистных сооружениях канализации водоканалов Удмуртской Республики.

Библиографические ссылки

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 Междунар. конф. : в 2 т. Т.1. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. С. 460–465.

2. Оценка загрязненности городских сточных вод антибиотическими препаратами цефалоспориновой группы и возможности их определения спектрофотометрическим методом / А. А. Абрамова, А. М. Батуева, А. В. Васильев, М. Ю. Дягелев, Е. Д. Наумкина, И. О. Чурсин // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2021. № 2. С. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05. EDN: NUTWVW.

3. Безбородова О. Е. Комплексная утилизация сточных вод предприятий : диссертация. М. : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 с.

4. Благоразумова А. М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2021. 208 с.

5. Брюханов А. Ю., Романов А. С., Белов П. В. Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126). С. 145–154. DOI: 10.24412/2713-2641-2026-1126-145-154. EDN: QVUIJE.

6. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Егоров С. А. Автоматизированная система управления биоферментатором барабанного типа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19, № 2. С. 4–10. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-4-10. EDN: PFNHMB.

7. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Базыкин В. И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025624770 Российская Федерация. База данных оборудования, применяемого в технологической линии для переработки твердых органических отходов методом биоферментации : заявл. 20.10.2025 : опубл. 28.10.2025 / А. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев, В. И. Базыкин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ". EDNRWLTFD.

8. Васильев Э. В., Романов А. С., Егоров С. А. Автоматизация технологического процесса переработки органических отходов путем разработки автономного биоферментатора // Техника и технологии в животноводстве. 2025. Т. 15, № 1. С. 63–68. DOI: 10.22314/27132064-2025-15-1-63. EDN: XXVNIS.

9. Волкова А. А., Шишукнов В. Г. Системный анализ и моделирование процессов в техносфере : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2019. 244 с. ISBN: 978-5-7996-2600-6. EDN: VRVHJV.

10. Метод сравнительной оценки тепловых потерь био-реакторов на этапе аванпроекта биогазовой установки / В. Н. Диденко, М. В. Свалова, А. В. Исаев, Н. Д. Узиков // Энергосбережение и водоподготовка : научно-технический журнал. 2019. № 5 (121). С. 61–65. EDN: QFKORS.

11. Корнюшкин Д. А., Крылов А. А. Задачи совершенствования современных автоматизированных систем управления технологическими процессами // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3 (99). С. 225–232. EDN: NROGYR.

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

13. Провоторова А. А. Сравнительный анализ использования аэротенков 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. EDN: WVZFMP.

14. Романов А. С. Определение теплового режима работы биоферментатора камерного типа // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2 (119). С. 82–92. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-82-9. EDN: THBOEA.

15. Смирнова А. П. Пути повышения эффективности работы метантенков // Научный форум: технические и физико-математические науки : сборник статей по материалам XXXI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 23–30.

16. 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.

17. Таскаев М. В., Гарибянова Л. А., Свалова М. В. Анализ конструкции метантенков для обработки осадка с очистных сооружений // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. № 1. С. 96–105. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-96-105. EDN: DUEWME.

18. Ханова Е. Л., Сахарова А. А., Геращенко А. А. Способ интенсификации работы метантенков с разделением фаз брожения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 72–79. EDN: BTTGJA.

19. 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.

20. NilgünBalkaya, ErcanErkan. Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge// Desalination and Water Treatment. 2019. № 17. P. 61-69.

21. 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. 15p. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00007

References

1. Abramova A.A., Isakov V.G., Nepogodin A.M. [Green technologies in the treatment of surface and wastewater of housing and communal services]. *Materialy VIII Mezhdunar. konf. «Tekhnicheskie universitety: integratsiya s evropeyskimi i mirovymi sistemami obrazovaniya» : v 2 t. T.I.* Izhevsk: Izd-vo IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2019. Pp. 460-465 (in Russ.).

2. Abramova A.A., Batueva A.M., Vasilev A.V., Dyagelev M.Yu., Naumkina E.D., Chursin I.O. [Assessment of contamination of urban wastewater with antibiotic drugs of the cephalosporin group and the possibility of their determination by spectrophotometric method]. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2021. No. 2. Pp. 53-65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05. EDN: NUTWVV (in Russ.).

3. Bezborodova O.E. [Integrated wastewater treatment of enterprises]. *Dissertation*. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 p. (in Russ.).

4. Blagorazumova A.M. [Treatment and dewatering of urban wastewater sludge]. *Textbook*. Saint Petersburg: Lan, 2021. 208 p. (in Russ.).

5. Bryukhanov A.Yu., Romanov A.S., Belov P.V. [Theoretical substantiation of the design and technological parameters of an organic waste mixer]. *Agro EkoInzheneriya*. 2026. No. 1 (126). Pp. 145-154. DOI: 10.24412/2713-2641-2026-1126-145-154. EDN: QVUIJE (in Russ.).

6. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A. [Automated control system for a drum-type biofermenter]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2025. Vol. 19, No. 2. Pp. 4-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-4-10. EDN: PFNHMB (in Russ.).

7. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Bazykin V.I. [Certificate of state registration of database No. 2025624770 Russian Federation. Database of equipment used in the technological line for processing solid organic waste by biofermentation]. *Appl.* 20.10.2025, Publ. 28.10.2025. Applicant: Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM". EDN: RWLTFD (in Russ.).

8. Vasilev E.V., Romanov A.S., Egorov S.A. [Automation of the technological process of processing organic waste by developing an autonomous biofermenter]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2025. Vol. 15, No. 1. Pp. 63-68. DOI: 10.22314/27132064-2025-15-1-63. EDN: XXVNIS (in Russ.).

9. Volkova A.A., Shishkunov V.G. [System analysis and modeling of processes in the technosphere]. *Textbook*. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2019. 244 p. ISBN: 978-5-7996-2600-6. EDN: VRVHJV (in Russ.).

10. Didenko V.N., Svalova M.V., Isaev A.V., Uzakov N.D. [Method for comparative assessment of heat losses of bioreactors at the stage of the pre-project of a biogas plant]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2019. No. 5 (121). Pp. 61-65. EDN: QFKORS (in Russ.).

11. Korniyushkin D.A., Krylov A.A. [Problems of improving modern automated process control systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2023. No. 3 (99). Pp. 225-232. EDN: NROGY (in Russ.).

12. Okovitaya K.O. [Improving the efficiency of digesters]. *Effektivnye tekhnologii v oblasti vodopodgotovki i ochistki v sistemakh vodosnabzheniya i vodootvedeniya*. 2021. Pp. 54-56. EDN: MNWLYQ (in Russ.).

13. Provotorova A.A. [Comparative analysis of the use of aeration tanks and digesters in wastewater treatment]. *Sovremennaya nauka i ee resursnoe obespechenie: Innovatsionnaya paradigma : sbornik statey po materialam VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2021. Pp. 97-102. EDN: WVZFMP (in Russ.).

14. Romanov A.S. [Determination of the thermal regime of a chamber-type biofermenter]. *AgroEkoInzheneriya*. 2024. No. 2 (119). Pp. 82-92. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-82-9. EDN: THBOEA (in Russ.).

15. Smirnova A.R. [Ways to improve the efficiency of digesters]. *Nauchnyy forum: tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki : sbornik statey po materialam XXXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2020. Pp. 23-30 (in Russ.).

16. Suvorova E.V., Mikryukova E.M. [Overcoming problems with wastewater treatment from dense emulsions in the oil refining industry]. *Stroitelstvo i zastroika: Zhiznennyy tsikl - 2020 : materialy V Mezhdunarodnoy (XI Vserossiyskoy) konferentsii*. Cheboksary, 2020. Pp. 415-422 (in Russ.).

17. Taskaev M.V., Gariyfanova L.A., Svalova M.V. [Analysis of the design of digesters for sludge treatment from treatment facilities]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2022. No. 1. Pp. 96-105. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-96-105. EDN: DUEWME (in Russ.).

18. Khanova E.L., Sakharova A.A., Gerashchenko A.A. [Method for intensifying the operation of digesters with phase separation of fermentation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arkhitektura*. 2019. No. 1 (74). Pp. 72-79. EDN: BTTGJA (in Russ.).

19. Yukhin D.P. [On the issue of increasing the efficiency of the digester of a biogas plant]. *Nauka molodykh - innovatsionnomu razvitiyu APK : materialy XII natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh*. 2019. Pp. 168-172 (in Russ.).

20. NilgünBalkaya, ErcanErkan. Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge // Desalination and Water Treatment. 2019. No. 17. Pp. 61-69.

21. 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. 2020.15p. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00007>.

* * *

Automated Control Model Development for the Technological Process of Sewage Sludge Anaerobic Digestion in a Bioreactor

M. V. Parshikova, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article presents the research results and modeling processes conducted at the experimental site of the Department of Water Supply and Water Treatment at Kalashnikov Izhevsk State Technical University. The aim of the research is to develop a model for automating work processes in a biogas plant for anaerobic digestion based on the analysis of measurable parameters. A system for technological process automated control in the bioreactor is proposed, utilizing actuators and intelligent multi-parameter sensors capable of data exchange with a handheld personal computer (smartphone) via wireless communication. The article outlines the overall architecture of the multi-parameter intelligent sensors and compatible actuators used in monitoring and control the technological process in the bioreactor. It also presents the basic architecture of the intelligent multi-parameter sensor for the bioreactor.

The research results and the structural diagram of the developed two-section biogas plant with a semi-automatic control system are provided including independent mixing devices for each section, independent substrate liquid heating systems for each section, and an electrical control panel for monitoring significant process factors. The article discusses a comparative analysis of technological processes for the organic waste disposal and presents functional diagrams for bioreactor automated operation with respect to the climate conditions of the Udmurt Republic, based on literature sources.

It examines the basic connection diagrams for sensors to recording devices enabling the operator to control the technological process of organic waste disposal while regulating the temperature in the bioreactor. Technological process automation of organic waste anaerobic digestion in the bioreactor will increase the volume of biogas produced and enhance the energy efficiency of the method.

Keywords: bioreactor, multiparametric intelligent sensor, automation model, wastewater sludge, automatic control system.

Получено: 08.04.26

Образец цитирования

Паршикова М. В. Разработка модели автоматизированного управления технологическим процессом анаэробного сбраживания осадков сточных вод в биореакторе // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 3. С. 23–29. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-23-29.

For Citation

Parshikova M.V. [Development of a model for automated control of the technological process of anaerobic digestion of wastewater sludge in a bioreactor]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2026. Vol. 24, No. 3. Pp. 23-29 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-23-29.