

УДК 631.172

**ВЕНДИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: mamontov.ay@mrsk-1.ru

**МАМОНТОВ АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ**<sup>2</sup>

E-mail: mamontov.ay@mrsk-1.ru

<sup>1</sup> Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, ул. Вавилова, 1, п. Майский, 308503, Белгородский район, Российская Федерация<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, 308012, Белгород, Российская Федерация

## АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКАМЕРНОМ БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАГРУЗКИ СЫРЬЯ

В ходе экспериментальных исследований с выбором наиболее эффективной системы перемешивания и количеством камер в метантенке разработана модель многокамерного реактора непрерывной загрузки сырья, в каждой камере которого осуществляется индивидуальный перемешивающий режим. Причины перехода к индивидуальному для камерам режиму: повышенный выход биогаза за счет достижения сбалансированного перемешивания от I камеры, где лопасти самые длинные, а перемешивание наиболее интенсивное, к IV камере, где лопасти наиболее короткие, а перемешивание осуществляется значительно реже. Эффективный выход газа наблюдается, когда загрузка и слив массы непрерывны. Для каждой фазы сбраживания характерна определенная частота перемешивания и температурный режим: возникает необходимость осуществления работы с регулируемым температурным режимом и перемешиванием для реактора в анаэробных условиях. К анализу предлагаются однолинейные схемы индивидуального обогрева, перемешивания исходя из фаз сбраживания, а также автоматизированное управление обогрева камер для уменьшения энергопотребления и максимальной эффективности переработки.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, реактор, биогаз, автоматизация технологических процессов, Белгородская область.

**Введение.** На данный момент во всем мире эксплуатируется не менее 60 технических методов получения биогаза из растениеводческого и животноводческого субстрата. Анаэробное сбраживание – самый популярный, эффективный и надежный метод получения биогаза. При его сжигании в ГПД или ГТУ появляются тепловые и электроэнергетические ресурсы, направляемые как на поддержание температуры собственных нужд (18...60°C) реактора, так и в промышленную сеть. Анаэробное сбраживание осуществляется в реакторах разного вида, типа, конструкционных предпочтений и формы [1]. Также различают места установки реакторов: например, наземные и подземные, располагающиеся с точки зрения климатических условий и удобства их обслуживания.

Биомасса, смешиваясь в расходной ёмкости с жомом, разбавленная водой до нужной консистенции, попадает в реактор. Процесс реакции проходит при температуре не ниже 25°C. С повышением температуры сбраживания соответственно повышает-

ся интенсивность прохождения реакции. При этом нежелательна пониженная температура обогрева, так как выход биогаза будет недостаточно эффективен. Слишком высокое значение температуры не приведет к повышенному получению биогаза, более того, это чревато потерями энергоресурсов. Так происходит и с перемешиванием массы: на всех этапах эффективны разные циклы перемешивания (12...18 оборотов/4–6 ч) в зависимости от стадии сбраживания.

**Цель исследования** – создание реактора, в котором каждая фаза брожения будет проходить в своей камере, с отдельным перемешиванием и температурным режимом. Реактор должен учитывать основные параметры физического и химического состояния разбавленной массы и должен предусматривать непрерывную загрузку сырья. Компоновка реактора должна учитывать необходимые коммуникационные отверстия между расходной ёмкостью и реактором, обеспечивающие связь между камерами и сливом удобрений.

*Задачи исследования:*

1. Обоснование температурных параметров каждой фазы.
2. Обоснование перемешивания камер.
3. Разработка реактора с эффективными функциями сбраживания.
4. Предложение технических средств для реализации автоматизированного управления реактором.

Благодаря выполнению указанных задач появится возможность получать максимальное количество биогаза из имеющегося сырья и эффективно использовать энергоресурсы на его перемешивание и обогрев.

**Материалы и методы.** *Режим температуры реактора.* Реакция анаэробного сбраживания протекает в несколько химических этапов, указанных на рисунке 1.

Для эффективного получения биогаза из массы можно выделить 3 температурных режима, приведенных в таблице 1. Брожение массы проходит в изотермических условиях. Также наблюдается за-

висимость времени цикла от выхода биогаза и температуры.

Предлагается самостоятельно настроить обогрев камер, выбрав удобную конфигурацию. В нашем случае рекомендуется термофильный режим, так как уничтожение вредных носителей в удобрениях ведет к повышению социального фактора качества, уменьшению риска заражения животных и человека. Большое количества энергии, затраченной на достижение высокой температуры реактора, компенсируется коротким циклом реакции и более эффективным выходом биогаза.

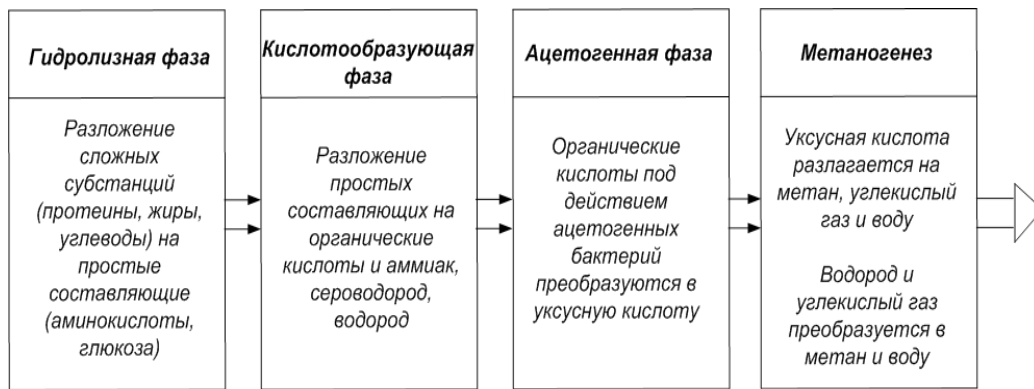
Примем при термофильном режиме

$$\tau_{\text{конв.}} = \tau_{\text{обор.р.}}$$

тогда получим

$$V_{\text{отх}} = \frac{V_p}{\tau_{\text{конв.}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{сутки}}$$

Выход биогаза в реакторе непрерывной загрузки будет происходить эффективнее, если в ниж-



**Рис. 1. Поэтапное протекание реакции анаэробного сбраживания**

*Таблица 1*

**Температурные режимы сбраживания отходов животноводства и характеристики этих режимов**

Режим	Температура сбраживания биомассы, °С	Преимущества	Недостатки
Психрофильный	18...26	Установки без внутреннего обогрева, отсутствует температурный контроль	Длительный цикл сбраживания, низкое количество полученного биогаза
Мезофильный	29...37	Сохраняются аминокислоты, впоследствии позитивно влияющие на состав брикетов удобрений	Частичное обеззараживание биогумуса
Термофильный	51...59	Высокая скорость разложения сырья. Полное уничтожение болезнетворных бактерий	Большое количество энергии, используемой на собственные нужды реактора

ней камере реактора масса будет нагреваться не до крайней точки в 59°C, а поэтапно, начиная с 51°C в начальной камере и до 59°C на конечном этапе. Тем самым эффективность выработки биогаза повышается на 2...5% за счет более равномерного по фазного распределения и отсутствия критических значений температуры. При разложении протеинов, жиров и углеводов на аминокислоты и глюкозу не требуется температура выше 51...52°C. При кислотообразующей фазе на выходе будет сероводород, водород, аммиак и органические кислоты. Для протекания реакции при данной фазе рекомендована температура 53...54°C. В ацетогенной фазе интервал температур составит 55...57°C. При метаногенезе температура должна достигать предельного значения 58...59°C, и реакция для массы с данной температурой должна приближаться к завершающей стадии.

Причины перехода на такой температурный режим:

- повышенный выход биогаза за счет достижения сбалансированных температур каждой фазы сбраживания;

- повышенная эффективность удобрений за счет сбережения ряда аминокислот;

- экономия энергоресурсов, затраченных на обогрев реактора.

С соблюдением указанных условий, появляется возможность регулировать не только температуру сбраживания, но и цикл реакции.

*Оборотное время.* Под обратным временем реактора принимается цикл реакции, который начинается от попадания массы из расходной ёмкости в первую камеру реактора до окончания цикла и слива отработанной массы [2]. Соответственно регулировка температуры поможет скорректировать время оборота. Для непрерывной загрузки сырья время оборота зависит от общего объема реактора и объема загружаемой массы. Термофильный режим характеризуется временем 7–10 сут., мезофильный – 10–20 сут., психрофильный – от 30 и более суток сбраживания.

*Перемешивание биомассы.* Перемешивание биомассы является решающим и одним из основных факторов эффективного получения биогаза. Перемешивание должно осуществляться периодически, с определенной частотой. Приоритетными задачами перемешивания будут обеспечение равномерности обогрева биомассы; равномерное проникновение бактерий в свежий субстрат; отделение готового биогаза от массы; рациональное использование всей площади поверхности реактора; обеспечение однородности массы во избежании корок и осадка.

**Результаты и обсуждение.** Так как способов сбраживания несколько, то появляется возможность выбрать перемешивание, подходящее поставленным условиям. В любом случае нужно учесть, что процесс сбраживания – это взаимодействие между группами бактерий, которые также питают друг друга. Если связь нарушается, то процесс

сбраживания будет малоэффективен до того момента, как будет образована новая группа сообщающихся бактерий. Поэтому был сделан вывод: интенсивное, частое и продолжительное перемешивание вредит реакции. В зависимости от стадии сбраживания рекомендован режим меремешивания, указанный на таблице 2.

Таблица 2

Выбор перемешивания биомассы

Фаза сбраживания	Временной цикл перемешивания, ч	Количество оборотов, п	Применяемая длина лопастей*
Гидролизная	4	18	1
Кислотообразующая	4,5	15	0,9
Ацетогенная	5	13	0,8
Метаногенез	6	12	0,7

\* Длина лопастей при гидролизной фазе принята за коэффициент 1. При расчете длины лопастей для мешалок следующих фаз можно умножить длину первой на указанные коэффициенты.

Исходя из данной таблицы, можно сделать вывод, что по мере протекания реакции уменьшается как длина лопастей, так и интенсивность перемешивания. Это необходимо для того, чтобы не допускать лишнего расторжения связи бактерий и биомассы. Лишнее перемешивание вредит выходу полезного биогаза [3].

Безусловно, благодаря достижению условий температуры и перемешивания можно получить максимальное количество биогаза [4]. Но для включения и отключения обогрева, перемешивания нужен дополнительный диспетчер, управляющий общим технологическим процессом. Разумеется, дополнительные трудоресурсы принесут более длительный срок окупаемости биогазовой станции, поэтому было принято решение использовать систему контроля температуры и управления перемешиванием на базе микроконтроллера (МК).

МК, лежащий в основе системы, позволяет получить гибкое энергоэффективное решение с широкими возможностями, реализованное одним компактным элементом вместо набора микросхем, что позволяет снизить энергопотребление, размеры и стоимость созданных на его основе устройств.

Для контроля над температурой в камерах метантенка предложено использовать герметичный датчик температуры, основанный на популярной микросхеме DS18B20 [5], который позволяет определять температуру в диапазоне от -55°C до +125°C, что соответствует необходимым условиям работы. Данные поступают от датчика в виде цифрового сигнала с 12-битным разрешением по протоколу

1-Wire, который использует всего один цифровой порт контроллера.

Получив ответ от датчика, программное обеспечение микроконтроллера сверяет полученное значение с указанным в коде ПО и, если значение ниже необходимого, подает сигнал на затвор MOSFET-транзистора, который, открываясь, питает реле, управляющее в данном случае нагревательным элементом (рис. 2).

Вариант принципиальной электрической схемы устройства показан на рисунке 3.

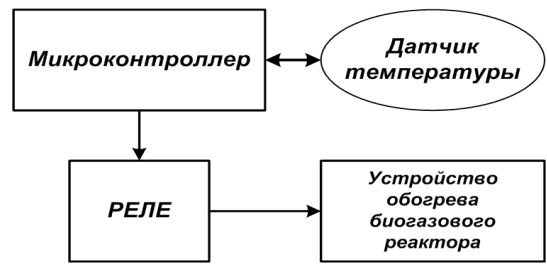


Рис. 2. Блок-схема устройства терморегуляции

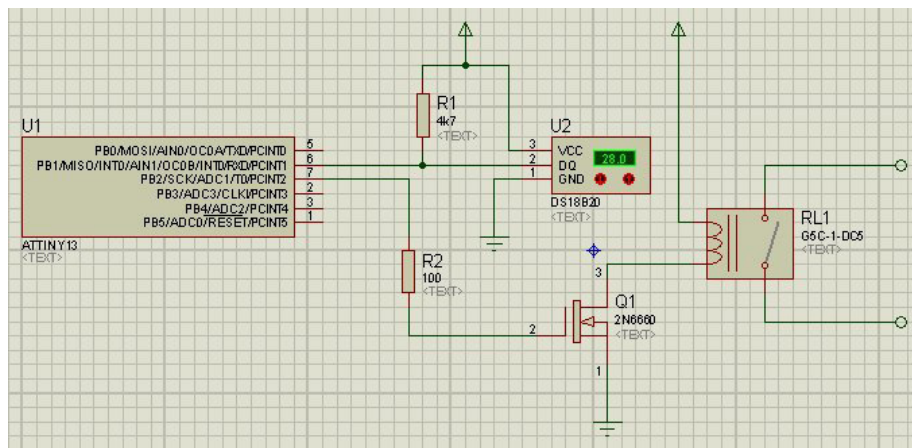


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема устройства терморегуляции

На схеме U1 – распространенный и доступный микроконтроллер семейства AVR от компании Atmel модели ATtiny13, U2 – герметичный датчик температуры на микросхеме DS18B20, Q1 – MOSFET-транзистор 2N6660 [5].

Устройство управления системой перемешивания содержит те же элементы, что и система терморегуляции, за исключением термодатчика [6]. Блок-схема представлена на рисунке 4, вариант принципиальной электрической схемы [7] – на рисунке 5.

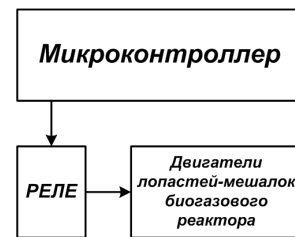


Рис. 4. Блок-схема устройства перемешивания

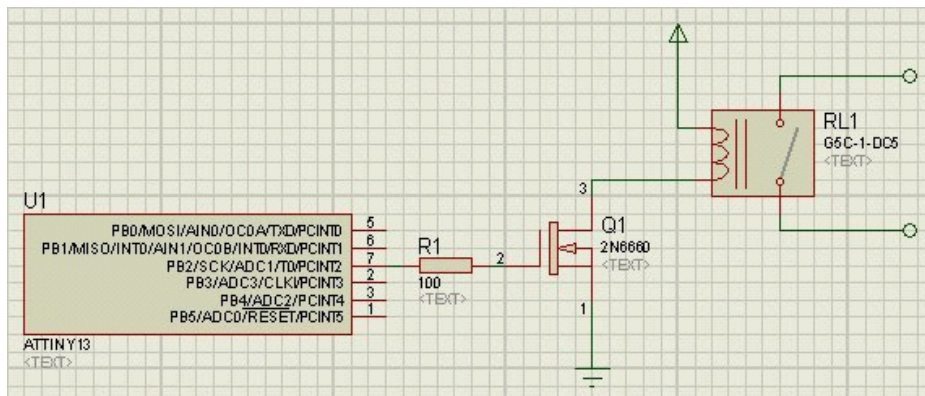


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема устройства управления системой перемешивания

### Выводы

Использование автоматизированных средств контроля и управления биогазовыми станциями несет в себе повышение надежности выработки газа и сбережение энергоресурсов. Устройства на базе микроконтроллеров имеют возможность интеграции в предложенный реактор непрерывной загрузки сырья с указанными параметрами.

### Библиографический список

1. Капустин В.П. Совершенствование систем уборки и транспортировки бес-подстильного навоза. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2001. 123 с.
2. Завражнов А.И. Технологии и оборудование для компостирования органических отходов / А.И. Завражнов, В.В. Миронов // Техника и оборудование для села. 2008. № 12. С. 19–21.
3. Мамонтов А.Ю. Программа расчета параметров газгольдера и реактора биоэнергетической станции / А.А. Виноградов, А.Ю. Мамонтов, А.В. Каплин // Вестник Мичуринского аграрного университета. 2015. № 4. С. 186–193.
4. Мамонтов А.Ю. Газовая турбина и газопоршневой двигатель в системах электроснабжения аг-

ропромышленных предприятий / А.А. Виноградов, В.В. Недосеков, А.Ю. Мамонтов, Н.О. Шаршуков // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 2. С. 31–35.

5. Мамонтов А.Ю. Компьютерная программа расчета параметров животноводческой фермы с биостанцией / А.А. Виноградов, А.Ю. Мамонтов, А.В. Каплин // Промышленная энергетика. 2016. № 5. С. 46–49.

6. Изготовитель полупроводниковых электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atmel.com/images/doc2535.pdf> (дата обращения 10.02.2016 г.).

7. Белоусов А.В., Кошлич Ю.А., Быстров А.Б. Перспективы применения современных статистических и детерминированных методов прогнозирования в системах мониторинга энергопотребления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 192–196.

8. Производитель аналоговых и цифро-аналоговых интегральных систем [Электронный ресурс]. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (дата обращения 10.02.2016 г.).

*Статья поступила 24.03.2016*

## AUTOMATION OF MECHANICAL AND THERMAL PROCESSES IN MULTICHAMBER BIOGAS REACTOR WITH CONTINUOUS RAW STOCK FEED

**SERGEY V. VENDIN**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

E-mail: [mamontov.ay@mrsk-1.ru](mailto:mamontov.ay@mrsk-1.ru)

**ARTEM YU. MAMONTOV**<sup>2</sup>

E-mail: [mamontov.ay@mrsk-1.ru](mailto:mamontov.ay@mrsk-1.ru)

<sup>1</sup>Belgorod State Agrarian University named after V.Yu.Gorin, Vavilova str., 1, Maisky, 308503, Belgorod region, Russian Federation

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Kostyukova str., 46, 308012, Belgorod, Russian Federation

In experimental studies, selecting the most efficient mixing system and the number of chambers in the digester, the authors have designed a model of a multichamber reactor with continuous raw stock feed, each chamber featuring an individual mixing mode. The reasons to select blade-mixers with individual lengths are to ensure increased biogas yield achieved by balanced mixing from Chamber I with the longest blades and the most intense mixing to Chamber IV with the shortest blades, and less frequent mixing. Efficient gas yield is observed in case of continuous raw stock loading and draining. Each phase of fermentation is characterized by a certain mixing frequency and temperature: the work should be carried out with a controlled reactor temperature and mixing mode under anaerobic conditions. The analysis is supplemented with single-line diagrams of separate heating and mixing modes based on the fermentation phases, as well as automatic control of chamber heating to reduce energy consumption and maximize processing efficiency.

**Key words:** energy efficiency, reactor, biogas, technological process automation, Belgorod region.

### References

1. Kapustin V.P. Sovershenstvovanie sistem uborki i transportirovki bespodstilochnogo navoza [Improving non-litter manure cleaning and transportation systems]. Tambov: TSTU Publishing, 2001. 123 p.
2. Zavrazhnov A.I. Tekhnologii i oborudovanie dlya kompostirovaniya organicheskikh otkhodov [Technologies and equipment for organic waste composting] / A.I. Zavrazhnov, V.V. Mironov // Farm Machinery and Equipment. 2008. Issue 12. Pp. 19–21.
3. Mamontov A.Yu. Programma rascheta parametrov gazgol'dera i reaktora bioenergeticheskoy stantsii [Computer program for designing gasholder and bioenergy plant reactor] / A.A. Vinogradov, A.Yu. Mamontov, A.V. Kaplin // Herald of Michurinsk Agrarian University. 2015. Issue 4. Pp. 186–193.
4. Mamontov A.Yu. Gazovaya turbina i gazopornshnevoy dvigatel' v sistemakh elektrosnabzheniya agropromyshlennykh predpriyatiy [Gas turbines and gas engines in power supply systems of farm enterprises] / A.A. Vinogradov, V.V. Nedosekov, A.Yu. Mamontov, N.O. Sharshukov // Energy Security and Energy Efficiency. 2016. Issue 2. Pp. 31–35.
5. Mamontov A.Yu. Komp'yuternaya programma rascheta parametrov zhivotnovodcheskoy fermy s biostantsiey [Computer program for calculating livestock farm parameters with a biostation] / A.A. Vinogradov, A.Yu. Mamontov, A.V. Kaplin // Industrial Power Engineering. 2016. Issue 5. Pp. 46–49.
6. Izgotovitel' poluprovodnikovyykh elektronnykh komponentov [The manufacturer of semiconductor electronic components] [Electronic resource]. URL: <http://www.atmel.com/images/doc2535.pdf> (reference date 10.02.2016).
7. Belousov A.V., Koshlich Yu.A., Bystrov A.B. Perspektivy primeneniya sovremennykh statisticheskikh i determinirovannykh metodov prognozirovaniya v sistemakh monitoringa energopotrebleniya [Prospects for using modern statistical and deterministic forecasting methods in energy consumption monitoring systems] // Herald of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2012. Issue 4. Pp. 192–196.
8. Proizvoditel' analogovykh i tsifro-analogovykh integral'nykh sistem [The manufacturer of analog and hybrid integrated systems] [Electronic resource]. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (reference date 10.02.2016).

Received on March 24, 2016

УДК 621.316

**ЛЕЩИНСКАЯ ТАМАРА БОРИСОВНА**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: tamara.leschinskaya@gmail.com

**КНЯЗЕВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**, зам. начальника<sup>2</sup>

E-mail: knyazev@ftc-energo.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

<sup>2</sup> Управление перспективного развития ПАО «Федеральный испытательный центр», ул. Беловежская, 4, Москва, 121353, Российская Федерация

## РАНЖИРОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 10 кВ

В статье выбраны и обоснованы критерии оценки качества функционирования систем электроснабжения потребителей сельских районов. Критерием оценки надежности электроснабжения принят показатель недоотпуска электроэнергии потребителям из-за вероятных отказов электрооборудования. Показателем качества электроэнергии у потребителей выбраны потери напряжения в распределительных сетях 10 и 0,38 кВ, а в ряде случаев – «неодинаковость» напряжения. Экономическая эффективность оценивается показателем технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях, а физическое состояние электрических сетей – коэффициентом износа. В работе проведен анализ параметров и показателей существующих электрических сетей Подмосковья, осуществлен выбор варианта реконструкции ВЛ 10 кВ по многокритериальной модели с учетом неопределенности электрических нагрузок. Решена задача ранжирования очередности проведения реконструкции ВЛ 10 кВ конкретного региона по многокритериальному мультипликативному оценочному функционалу ( $F$ ). При значении оценочного функционала до 1500 не требуется преобразование электрической сети, при значении более 1500 необходима реконструкция сетей.