

Научная статья

УДК 631.3.021

doi: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-104-113

## Исследование температурной однородности перемешиваемой среды в биогазогумусной установке

Амур Григорьевич Фиапшев<sup>✉1</sup>, Марат Мухамедович Хамоков<sup>2</sup>,  
Олеся Хаутиевна Кильчукова<sup>3</sup>, Батыр Амурович Фиапшев<sup>4</sup>

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

<sup>1</sup>energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

<sup>2</sup>h-mm\_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>

<sup>3</sup>energo\_80@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9796-3775>

<sup>4</sup>fiapsh99@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0000-2743-2207>

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы развития производства биогазовых установок и путей повышения выхода биогаза и биоорганических удобрений. При анаэробном метановом сбраживании навоза и других сельскохозяйственных отходов можно получить биогаз, который позволит обеспечить до 20-25% потребности в газовом топливе и ценные органические удобрения с повышенной биологической активностью. Такая переработка сельскохозяйственных отходов является наиболее эффективным природоохранным мероприятием, обеспечивающим его дезодорацию, снижение загрязнения почвенного покрова, водных ресурсов и атмосферы загрязняющими веществами и патогенной флорой. Переработка сельскохозяйственных отходов на биогазовых установках – сложная задача, которая в настоящее время еще не решена в полной мере касательно вопросов, связанных с установками данного типа. Мировые производители биогазовых установок в основном ориентируются на силосную массу в составе сырья, закладываемого в биогазовые установки. В то же время животноводческим комплексам, как правило, не хватает посевных площадей для выращивания энергетических культур с большой массой растительных отходов. В связи с этим разработана технологическая схема биогазогумусной установки (БГУ), обеспечивающей однородность температуры смешанной среды в ней для нужд малых фермерских хозяйств, в состав которой входят: метантенк, газгольдер, перемешивающее устройство, запорно-регулирующая и контролирующая аппаратура. Теоретическая температурная однородность перемешиваемой среды достигается при совмещении теплообменника и перемешивающего устройства в один узел. Показано, что теоретическая температурная однородность перемешиваемой среды достигается при совмещении теплообменника и перемешивающего устройства в один узел, конструктивно-технологические параметры, характеризующие интенсивность принудительного движения сбраживаемой массы, – при изменении теплопроводности. Расчеты показали, что температурная однородность перемешиваемой в разработанной БГУ среды составляет 0,98, что соответствует ее технологически допустимым значениям.

**Ключевые слова:** биотехнология, нетрадиционные источники энергии, биогазовая установка, метантенк, температурная однородность, коэффициент теплоотдачи, перемешивание, переработка сельскохозяйственных отходов

**Для цитирования.** Фиапшев А. Г., Хамоков М. М., Кильчукова О. Х., Фиапшев Б. А. Исследование температурной однородности перемешиваемой среды в биогазогумусной установке // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 2(40). С. 104–113. doi: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-104-113

Original article

## Investigation of the temperature homogeneity of the stirred medium in a biogas-humus plant

Amur G. Fiapshev<sup>✉1</sup>, Marat M. Khamokov<sup>2</sup>, Olesya Kh. Kilchukova<sup>3</sup>, Batyr A. Fiapshev<sup>4</sup>  
Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,  
Russia, 360030

<sup>1</sup>energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

<sup>2</sup>h-mm\_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>

<sup>3</sup>energo\_80@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9796-3775>

<sup>4</sup>fiapsh99@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0000-2743-2207>

**Abstract.** The article deals with the development of the production of biogas plants and ways to increase the yield of biogas and bioorganic fertilizers. It is potentially possible with anaerobic methane digestion of manure and other agricultural waste to obtain biogas, which will provide up to 20-25% of the need for gas fuel and valuable organic fertilizers with increased biological activity. Such processing of agricultural waste is the most effective environmental measure that ensures its deodorization, and reduces the pollution of soil, water resources and the atmosphere with pollutants and pathogenic flora. The processing of agricultural waste in biogas plants is a complex task that has not yet been fully resolved regarding the issues associated with plants of this type. World manufacturers of biogas plants are mainly focused on the silage mass as a part of the raw material laid in biogas plants. At the same time, livestock complexes, as a rule, do not have enough sown areas for growing energy crops with a large mass of plant waste. A technological scheme of a biogas-humus plant has been developed to ensure the uniformity of the temperature of the mixed medium in it for the needs of small farms, which includes: a methane tank, a gas tank, a mixing device, shut-off and control equipment. The theoretical temperature homogeneity of the mixed medium is achieved by combining the heat exchanger and the mixing device into one unit. It is shown that the theoretical temperature uniformity of the stirred medium is achieved by combining the heat exchanger and the mixing device into one unit, design and technological parameters characterizing the intensity of the forced movement of the fermented mass, with a change in thermal conductivity. Calculations have shown that the temperature uniformity of the medium mixed in the developed biogas plant is 0.98, which corresponds to its technologically acceptable values.

**Keywords:** biotechnology, non-traditional energy sources, biogas plant, digester, temperature uniformity, heat transfer coefficient, mixing, agricultural waste processing.

**For citation.** Fiapshev A.G., Khamokov M.M., Kilchukova O.Kh., Fiapshev B.A. Investigation of the temperature homogeneity of the stirred medium in a biogas-humus plant. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2023;2(40):104–113. (In Russ.).  
doi: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-104-113

**Введение.** Древнейшим биотехнологическим процессом была ферментация с помощью микроорганизмов. Биотехнология, по своей сути, есть не что иное, как использование бактерий, их метаболических и биосинтетических возможностей, обеспечивающих выработку и получение особых веществ [1–3]. Применительно к новым отраслям техники развитие биотехнологии и извлечение выгоды ставит ряд проблем, связанных с общим направлением биологических исследований, с сотрудничеством исследователь-

ских институтов фундаментального профиля и промышленных предприятий, с профессионализмом в биотехнологии, а также с ролью государства и промышленных товаропроизводителей.

Совершенствование процессов брожения, повышение их эффективности, а также изучение многих биохимических реакций, при-сущих микроорганизмам, проводились параллельно с выделением веществ из клеток бактерий и грибов.

Текущие исследования по использованию микроорганизмов и клеточных культур для снижения загрязнения окружающей среды, производства энергии, получения удобрений вызывают большой интерес и стимулируют привлечение важных ресурсов для создания и развития промышленности, основанной на биотехнологии.

Отметим, что для всех этих процессов нужно сырье с относительно низким содержанием воды, а протекают они при высокой температуре. Биологические процессы обладают тем преимуществом, что для них пригодны сырье с высоким содержанием воды, а осуществляются они в интервале температур от 25 до 65°C. Разнообразие планируемых для использования видов сырья (биомассы) показано в таблице 1.

**Таблица 1.** Источники биомассы для выработки топлива

**Table 1.** Sources of biomass for fuel generation

Отходы	Наземные растения	Водные растения
Навоз	Лигноцеллюлоза	Водоросли
Активный ил	Деревья: эвкалипты, тополя, ели, сосны	Одноклеточные: <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Navicula</i>
Бытовой мусор		
Пищевые отходы		
Стоки		
Отходы древесины	Культуры, содержащие крахмал	Многokлеточные: бурые водоросли
Солома	Кукуруза	Растения
Шелуха	Культуры, содержащие сахар	Водяной гиацинт
Меласса	Сахарная свекла	Тростник, камыш

Ввиду вышеизложенного региональное сотрудничество может сыграть важную роль в будущем развитии биотехнологии, прежде всего в распространении технологии, подходящей для социально-экономических условий различных субъектов. Производство биогаза, получение безопасных и недорогих удобрений, биоэнергетика – вот примеры областей, предполагающих очевидный и быстрый практический выход, а также служащих основой для развития исследований на достаточно вы-

соком уровне. Со временем исследовательские работы в этих областях будут усложняться и совершенствоваться, сейчас же это под силу лишь немногим компаниям.

Одна из основополагающих задач состоит в том, чтобы способствовать международной научной и технологической кооперации, направленной на распространение знаний, усиление исследований и развитие инфраструктуры, а также облегчить обмен информацией и опытом.

Мероприятия включают наряду с усилением международного и регионального сотрудничества посредством расширения сети биотехнологических исследовательских центров разработку и претворение в жизнь инициатив и программ в области образования, исследований и применения биотехнологии одновременно с более совершенной оценкой возможных социальных и культурных последствий развития биотехнологии.

Другая важнейшая задача заключается в распространении научных и технологических знаний до широких масс, в распространении знаний посредством высокоэффективной популяризации науки и техники с использованием средств, доступных для восприятия людьми с различной структурой мышления, характерной для разных культур, и приспособленных к потребностям и уровню самой широкой аудитории.

Одним из первых направлений в области энергетики было производство метанола, этанола и биогаза. Во второй группе отраслей биотехнология охватывает производство органических удобрений, что повышает продуктивность сельского хозяйства, охрану окружающей среды и снижение загрязнения (очистка сточных вод, обработка бытовых отходов, компостирование, а также производство соединений, способных разлагаться микроорганизмами).

Процесс непрерывной газификации, который применяется к субстратам с низким содержанием органических веществ – городским и промышленным стокам и отходам сельскохозяйственного производства, можно в равной мере осуществить и при переработке навоза. Что касается стоков с предприятий по обработке сельскохозяйственной продукции пищевой промышленности, то с 1 кг органического вещества можно получить 0,63 м<sup>3</sup>

биогаза, содержащего 60% метана. Тем самым этот процесс вполне заменит энергоемкую аэробную переработку стоков (1 кВт-ч на 1 кг органического углерода). Он также позволит покрыть потребности в энергии производственных процессов по очистке сточных вод.

Государство должно помочь сформулировать исследовательскую политику и создать проекты прикладной биотехнологии, направленные на подготовку специалистов и повышение уровня компетентности, необходимой для выбора наиболее подходящей технологии.

В последнее время значительное потребление энергии в некоторых отраслях животноводства стало одной из наиболее важных статей затрат. Сложность учета всех возможных энергетических потерь состоит в том, что в животноводстве происходит своеобразный биологический процесс превращения энергии, где она может выступать в нескольких формах. Поэтому экономия ее возможна лишь при глубоком знании, как биологических, так и технологических особенностей этого процесса.

Таким образом, если развитие биотехнологических знаний считать детищем технического прогресса, то в настоящее время биотехнологическая наука, обогащенная ее техническими достижениями, в силах создать систему взаимосвязанных отраслей биотехнологии, обладающих уникальным достоинством: они будут основаны на функционировании природных систем, метаболические механизмы которых будут подчинены интересам человечества.

Вопросы выживания предприятия любой формы собственности во многом определяются состоянием энергоснабжения предприятия, грамотным использованием находящихся в его распоряжении энергоресурсов. Постоянное возрастание стоимости энергоресурсов приводит к необходимости развития энергосберегающих процессов и технологий.

Для фермерских хозяйств эти вопросы тесно переплетаются с экологическими проблемами, характерными для предприятий сельской местности, в частности проблемами утилизации отходов птицеводства и животноводства.

Энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) обладают рядом преимуществ: повсеместность нахождения, неисчерпаемость, бесплатность, безопасность экс-

плуатации, минимальное влияние на окружающую среду, то есть экологическая чистота, и достаточно высокая эстетичность [4].

ВИЭ практически не вносят в окружающую среду вновь образованные вредные вещества и являются экологически чистыми источниками энергии. ВИЭ – это составляющая часть окружающей среды и отсюда следует естественность и целесообразность их комплексного использования в различных отраслях малой энергетики и, в первую очередь, в системах энергоснабжения сельского хозяйства.

Таким образом, создание эффективных биогазовых установок, работающих на отходах сельского хозяйства, является особо актуальной технологической задачей для решения этой проблемы.

**Цель исследования** – разработка и исследование биогазогумусной установки (БГУ) для переработки отходов птицеводства и животноводства, позволяющей получать как газообразное топливо, так и высококачественные твердые и жидкие удобрения, готовые к применению.

Для достижения указанной цели предусмотрено решение следующих задач: изучение методов и способов получения биогаза; выбор оптимальной конструктивной схемы БГУ; расчет БГУ.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Исследование и анализ тепловых процессов, протекающих в разработанной БГУ (рис. 1) [5–7], проведены с использованием математического моделирования, которые могут быть описаны уравнениями термодинамики.

В установке с перемешивающим устройством коэффициент теплоотдачи зависит от размеров БГУ и мешалки. За характерные размеры БГУ и перемешивающего устройства приняты внутренний диаметр метантенка БГУ  $D$  и внешний диаметр перемешивающего устройства  $d$ . Также теплоотдача зависит от скорости движения сбраживаемой среды – числа оборотов мешалки  $n$ , от физико-механических свойств сбраживаемой среды: вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$ , теплоемкости  $c$ , теплопроводности  $\lambda$  и от отношения вязкостей среды на поверхности теплоотдачи  $\mu_c$  и в центре БГУ  $\mu$ , т. е.  $\mu/\mu_c$ . Последнее отношение учитывает влияние направления теплового потока на коэффициент теплоотдачи.

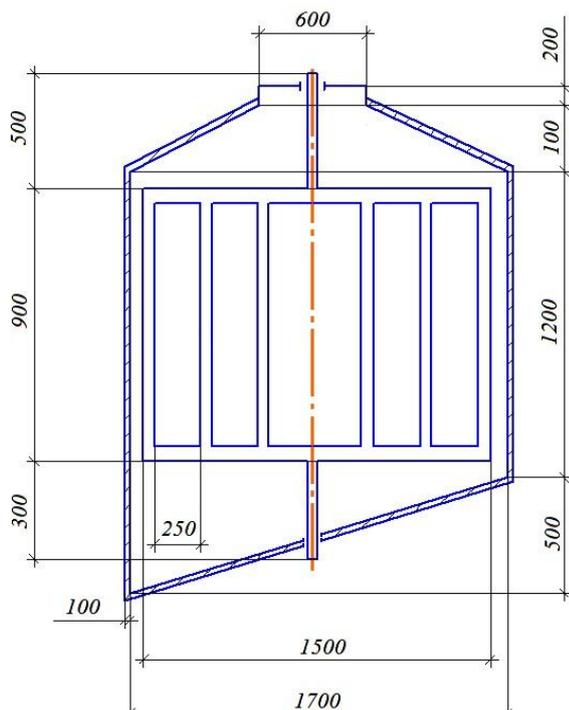


Рисунок 1. Технологическая схема биогазовой установки

Figure 1. Technological scheme of a biogas plant

**Результаты исследования.** Вопросы размещения птицеводческих и животноводческих комплексов в значительной мере определяются экологическими проблемами, которые они за собой влекут. Любое экологическое воздействие на окружающую природную среду определяется влиянием объекта на атмосферный воздух, водные и почвенные ресурсы.

Данный вопрос является одним из наиболее серьезных с точки зрения воздействия на окружающую природную среду. Среднесуточный выход помета от одной птицы мясного направления – 290 г. Ясно, что даже для маленького птичника на 1000 голов ежедневное накопление 290 кг помета – это серьезная проблема, которая может перерасти в серьезную проблему и для существования самого мелкого хозяйства при условии отсутствия необходимых свободных площадей для их утилизации (складирования), которые при этом должны быть специально оборудованы и достаточно далеко расположены от жилых объектов. Близость же этих птичников или мест складирования помета (навоза) к водным объектам вообще не допустимо. В данном случае начинают дейст-

вовать нормы расстояний, определяемых для санитарно-защитных зон, которые в зависимости от типа и вида объекта могут быть в пределах 200-2000 м. Отметим также и экономический аспект, определяемый тем ущербом, который сопровождает размещение отходов производства и оплачиваемый по специальным тарифам. Решение данной проблемы и обусловило значительный интерес к использованию технологий анаэробного сбраживания отходов птицеводства (сельскохозяйственного производства). В настоящее время в Кабардино-Балкарской Республике (КБР), как и во всей Российской Федерации, отходы сельскохозяйственного производства, как правило, перерабатывают с использованием тех же методов, что и при переработке технических и бытовых отходов, а именно методов захоронения и компостирования. Эти методы основаны на сборе отходов и их складировании в специально приспособленных для этих целей приемниках (навозохранилищах). Среди наиболее прогрессивных методов, нашедших свое применение как у нас в стране, так и за рубежом, являются методы, основанные на использовании биообъектов (красный калифорнийский червь), и анаэробное сбраживание отходов. Эти методы направлены на ускорение процесса сбраживания отходов и на получение из отходов гораздо более ценных органических удобрений.

Для анаэробного сбраживания используются БГУ, предназначенные для приготовления из растительных отходов, экскрементов животных и птицы высококачественных беззараженных органических удобрений и горючего газа на энергетические нужды. Этот метод позволяет почти полностью сохранить в готовом удобрении все компоненты питательных веществ для растений, которые содержались в исходном сырье. Органические удобрения получают обеззараженными от патогенных микроорганизмов, гельминтов и их семян, семян сорняков и могут быть использованы как для основной заправки почвы, так и для подкормки с поливом растений в период вегетации всех культур и при внутрипочвенном внесении. Вырабатываемый биогаз имеет калорийность 5500 ккал/м<sup>3</sup> и используется в качестве топлива для котлов и двигателей внутреннего сгорания [8].

Применение БГУ как альтернативных источников энергии во многом определяется ее конструктивными характеристиками и отработанными технологическими режимами.

Основная часть любой БГУ – метантенк. Конструкции метантенков чрезвычайно разнообразны. Однако предпочтение отдается метантенкам непрерывного действия, работающего на принципах вертикального смешения и вытеснения.

При периодической (циклической) схеме имеются две камеры брожения, которые загружают поочередно. В данном случае полезный объем камер используется менее эффективно, чем при непрерывной схеме.

Метантенки выполняют надземными, полуглубленными и заглубленными в грунт.

Камеры брожения изготавливают разной формы: цилиндрические, кубические, в виде параллелепипеда и более сложной конструкции. Они бывают одно- и двухсекционными, устанавливают их вертикально, горизонтально, горизонтально-наклонно. Метантенки изготавливают из металла, пластмассы, железобетона.

Газгольдеры предназначены для сбора и хранения биогаза. Простейшие газгольдеры объединяют с метантенком. Удобным в эксплуатации и потому перспективным в сельском хозяйстве является «мокрый» газгольдер низкого давления.

В естественных условиях распад биомассы происходит под действием множества бактерий, которые называют анаэробными. Процесс распада биомассы должен происходить при повышенной влажности и наличии теплоты, а также отсутствии света. В присутствии атмосферного кислорода углерод биомассы превращается (сгорает) в углекислый газ. Если биомасса находится в ограниченном объеме с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды, то при необходимых условиях развиваются анаэробные бактерии. Под влиянием этих бактерий углерод биомассы преобразуется в  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ .

Существуют условия, которые обеспечивают эффективность действия анаэробных бактерий. Основное из них – поддержание постоянной температуры. Как правило, выделяют три характерные температуры, соот-

ветствующие определенному виду анаэробных бактерий.

Нижняя температура, при которой происходит брожение, доходит до  $20^\circ\text{C}$ . Эта группа бактерий действует при температуре окружающей среды в теплый период года. За счет брожения происходит распад биомассы в трясине болот и появляется «болотный газ», который является биогазом.

При средних температурах, равных  $30\text{-}40^\circ\text{C}$ , развивается мезофильная группа бактерий. При этом оптимальной является температура  $32\text{-}40^\circ\text{C}$ . Высшее значение температур составляет  $45\text{-}60^\circ\text{C}$ . При этом происходит термофильное брожение (оптимальная температура – в пределах  $52\text{-}55^\circ\text{C}$ ).

Конструкционные и технологические параметры предлагаемой БГУ отличаются от известных тем, что перемешивающее устройство и нагревательный элемент совмещены в один узел. Такое совмещение позволяет нагревать и поддерживать заданный температурный режим более равномерно за счет вращения теплообменника и передаче тепла биомассе (субстрату) по всему объему метантенка.

Отношение вязкостей среды на поверхности теплоотдачи  $\mu_c$  и в центре биогазовой установки  $\mu$  учитывает влияние направления теплового потока на коэффициент теплоотдачи. Тогда можно записать, что:

$$\alpha = f(n, \mu, c, \lambda, \rho, d, D, \mu/\mu_c), \quad (1)$$

где:

- $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;
- $n$  – число оборотов мешалки;
- $c$  – теплоемкость субстрата;
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;
- $\rho$  – плотность субстрата.

Согласно принципам метода анализа размерностей теории подобия [9] зависимость (1) представим как степенную функцию:

$$\alpha = K_1 n^a \mu^f c^h \lambda^g \rho^e d^b D^i \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^c. \quad (2)$$

где:

- $K_1$  – интенсивность передачи тепла;
- $a, f, h, g, e, b, i$  – постоянные числа, не имеющие размерности.

Исходя из однородности этого уравнения, его можно выразить как функцию степенных комплексов и симплексов, состоящих из величин, входящих в выражение (1). Для этого определяем показатели степеней в нем, заменяя физические величины на их выражения через единицы измерения, представленные в основных единицах международной системы единиц (СИ):

$$\left[ \frac{\kappa \lambda}{c^3 K} \right] = \left[ \frac{1}{c} \right]^a \cdot \left[ \frac{\kappa \lambda}{M^* c} \right]^f \cdot \left[ \frac{M^2}{c^2 K} \right]^h \times \left[ \frac{\kappa \lambda^* M}{c^3 K} \right]^g \cdot \left[ \frac{\kappa \lambda}{M^3} \right]^e \cdot [M]^b \cdot [M]^i. \quad (3)$$

Члены с нулевой размерностью соответственно превратились в множители, равные единице. Сравнивая показатели степени у одинаковых размерностей, получим следующие равенства:

$$\begin{cases} 1 = e + f + g; \\ 0 = b - 3e - f + g + 2h + i; \\ -3 = -a - f - 3g - 2h; \\ -1 = -g - h. \end{cases} \quad (4)$$

Для определения семи неизвестных имеем систему четырех алгебраических уравнений. Если принять, что  $e$ ,  $h$ ,  $i$  нам известны, то из системы четырех уравнений находим:

$$\begin{cases} a = e; \\ b = 2e - i - 1; \\ f = h - e; \\ h = 1 - h. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя найденные значения показателей в исходное степенное уравнение

$$R = \frac{1}{\alpha_g D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{нн}}{D_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_u} \frac{D_u}{D_{нн}} + \frac{1}{\alpha_o D_{нн}}, \quad (6)$$

где:

$\lambda_u$  – коэффициент теплопроводности материала изоляции стенки метантенка, Вт/(м·°C);

$D_u$  – диаметр изоляции метантенка, м.,  
имеем:

$$\alpha = K_1 h^e \mu^{h-e} c^h \lambda^{1-h} \rho^e d^{2e-i-1} D^i \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^c. \quad (7)$$

После преобразования до безразмерных комплексов получим:

$$\frac{\alpha D}{\lambda} = K_1 \left( \frac{nd^2 \rho}{\mu} \right)^e \left( \frac{c\mu}{\lambda} \right)^h \left( \frac{D}{d} \right)^{i+1} \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^c. \quad (8)$$

Уравнение (8) можно написать в другой форме, используя критерии подобия Нуссельта ( $Nu$ ), Рейнольдса ( $Re_u$ ), Прандтля ( $Pr$ ), кроме того, выражение  $D/d = \Gamma_D$  является инвариантом геометрического подобия и его можно записать, как  $(D/d)^{i+1} K_1 = \Gamma_D K_1 = K$ , а выражение  $(\mu/\mu_c) = Vis$  является симплексом вязкостей пристеночного слоя сбрасываемого помета и ядра.

Окончательно получим:

$$Nu = K Re_u^A Pr^B Vis^E, \quad (9)$$

где:

$$e=A; h=B; c=E.$$

Таким образом, уравнение (9) является критериальным уравнением, описывающим теплоотдачу в сбрасываемом помете в условиях вынужденного движения.

После расшифровки критериев подобия выражение (9) примет вид:

$$\frac{\alpha B}{\lambda} = K \left( \frac{nd^2 \rho}{\mu} \right)^e \left( \frac{\mu c}{\lambda} \right)^h \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^c. \quad (10)$$

В зависимости от исследуемого материала данное уравнение будет иметь различные показатели степеней и константу.

Анализ приведенных выше уравнений показывает, что основное влияние на процесс теплоотдачи оказывают теплопроводность  $\lambda$ , плотность  $\rho$  и конструктивно-технологические параметры перемешивающего устройства – диаметр  $d$  и число оборотов  $n$ . Два последних параметра характеризуют интенсивность вынужденного движения сбрасываемого помета, изменяя при этом значение теплопроводности и плотности.

На практике, как известно, применяют большое многообразие перемешивающих устройств. Параметры  $n$  и  $d$  характеризуют перемешивающие устройства якорного и рамного типов. Чтобы оценить эффективность действия любого из всех других перемешивающих устройств применительно к перемешиванию сбрасываемой среды, необходимо выявить критерий, соответствующий процессу анаэробной переработки отходов птицеводства.

Эффективность перемешивания определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемешивание для достижения, требуемого технологического эффекта. Поскольку на практике для интенсификации процесса теплоотдачи применяются различные типы биоустановок и множество видов перемешивающих устройств, в качестве общей оценки работы последних данный критерий использоваться не может.

Качество перемешивания при интенсификации процессов теплообмена характеризуется степенью температурной однородности перемешиваемой среды, которая определяется значением

$$1 - \frac{\Delta T}{T_{ОПТ}} = \frac{T}{T_{ОПТ}}. \quad (11)$$

где:

$\Delta T$  – изменение температуры, °С;

$T$  – отклонение температуры субстрата, °С;

$T_{ОПТ}$  – оптимальное значение температуры субстрата, °С.

Обычно степень температурной однородности перемешиваемой среды задают по условиям технологического процесса. Период, необходимый для достижения заданной температурной однородности среды, называется временем перемешивания. Непосредственно время перемешивания определяется кратностью циркуляции и степенью турбулентности перемешиваемой среды [9]:

$$\tau = \frac{K_{Ц}V}{Q_{Ц}}, \quad (12)$$

где:

$\tau$  – время перемешивания, с;

$K_{Ц}$  – кратность циркуляции;

$V$  – рабочий объем перемешиваемой среды, м<sup>3</sup>;

$Q_{Ц}$  – объемный расход циркуляции, м<sup>3</sup>/с.

Ввиду особенностей биологического развития бактерий метаногенной ассоциации степень турбулентности имеет постоянное значение и на время перемешивания влияния не оказывает. Таким образом, время перемешивания  $\tau$ , а следовательно, и степень температурной однородности  $T/T_{ОПТ}$  сбрасываемого помета зависит от кратности циркуляции  $K_{Ц}$  в биогазовой установке:

$$\frac{T}{T_{ОПТ}} = f(K_{Ц}). \quad (13)$$

Теоретическая температурная однородность перемешиваемой среды ( $T/T_{ОПТ} = 1$ ) достигается при числе циркуляции, стремящейся к бесконечности ( $K_{Ц} \rightarrow \infty$ ). На практике необходимое количество циркуляции зависит от условий технологического процесса.

В результате расчетов с использованием приведенных теоретических зависимостей установлено, что степень температурной однородности перемешиваемой в разработанной БГУ среды составляет 0,98, что соответствует ее технологически допустимым значениям (0,96 и выше) [10].

**Выводы.** В результате анализа состояния проблемы установлено, что истощение запасов невозобновляемых энергоресурсов, рост цен на них и обострение экологических проблем обуславливает ускоренное осуществление научно-технических программ, направленных на разработку и практическое использование альтернативных местных ресурсов энергии. Значительно возобновился при таких обстоятельствах интерес к технологии анаэробного сбраживания органических отходов в биогазовых установках для получения энергии. Производство биогаза и получение высокоорганических удобрений из отходов животноводства – одно из возможных решений проблемы утилизации отходов животноводства и обеспечения энергоносителями большинства сельхозпредприятий.

В результате анализа конструкций существующих биогазовых установок установлено, что биореактор должен иметь герметичные коррозионно-стойкие стенки, надежную теплоизоляцию, надежные устройства загрузки и выгрузки. Наиболее распространенная форма реактора – цилиндрическая.

Разработана технологическая схема биогазовой установки, в состав которой входят: метантенк, газгольдер, перемешивающее устройство, запорно-регулирующая и контролирующая аппаратура.

В результате проведенных исследований установлено, что основное влияние на процесс теплоотдачи оказывают теплопроводность  $\lambda$ , плотность  $\rho$  и конструктивно-технологические параметры перемешивания.

вающего устройства – диаметр  $d$  и число оборотов  $n$ . Два последних параметра характеризуют интенсивность вынужденного движения сбраживаемого помета, изменяя при этом значение теплопроводности и плотности.

Требуемый состав азота и фосфора: 10% и 2% массы сухого сбраживаемого материала соответственно. При полном брожении биомассы образуются 50-75%  $\text{CH}_4$ , 45-20%  $\text{CO}_2$ , 1%  $\text{H}_2\text{S}$  и незначительные количества азота, кислорода, водорода и окиси углерода.

В среднем 1 м<sup>3</sup> биогаза при сгорании дает 21-29 МДж энергии, которая находится в 1 м<sup>3</sup> биогаза, эквивалентной энергии 0,6 м<sup>3</sup>

природного газа, 0,74 л нефти или 0,66 л дизельного топлива. От 1 м<sup>3</sup> биогаза, сжигаемого в газовом двигателе, приводящем в действие электрический генератор, можно получить 1,6 кВтч электроэнергии.

Биогаз можно сжигать в качестве топлива в отопительных установках, водонагревательных котлах, газовых плитах, в автотракторных двигателях, агрегатах инфракрасного излучения. Остаток (метановую бражку) можно использовать как удобрение.

Установлено, что температурная однородность перемешиваемой в разработанной БГУ среды составляет 0,98, что соответствует ее технологически допустимым значениям.

### Список литературы

1. Бондаренко А. М., Качанова Л. С. Эффективность технологизации процессов переработки органических отходов животноводства АПК // Экономика, управление. 2019. № 7. С. 54–61.
2. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Электроэнергия из биогаза // Актуальные вопросы аграрной науки. 2020. № 34. С. 27–37.
3. Бондаренко А. М., Качанова Л. С. Производство жидких концентрированных органических удобрений // Сельский механизатор. 2017. № 11. С. 30–31.
4. Тарнижевский Б. В. Состояние и перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в России // Промышленная теплоэнергетика. 2002. № 1. С. 231.
5. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Фиапшев А. Г. Разработка и исследование биореактора для получения биоудобрения и биогаза // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 2(40). С. 60–63.
6. Апажев А. К., Фиапшев Б. А., Кумахов А. А., Кильчукова О. Х., Хамоков М. М. Утилизация отходов животноводства с получением биогаза // International Agricultural Journal. 2022. Т. 65. № 5.
7. Фиапшев А. Г., Хамоков М. М., Кильчукова О. Х., Темукуев Б. Б., Фиапшев Б. А. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки для достижения максимального выхода биометана // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 3. С. 41–45.
8. Хамоков М. М., Шекихачев Ю. А., Алоев В. З., Курасов В. С., Темукуев Т. Б. Производственная и энергетическая эффективность использования биогазовой установки // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76. С. 333–342.
9. Столяров Ю. Ю. Технология и реологические свойства водных дисперсных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01, 05.13.01. Москва, 2005. 116 с.
10. Кожевников С. О. Разработка смеси для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Иваново: Изд-во ИГАСА, 2005. 140 с.

### References

1. Bondarenko A.M., Kachanova L.S. Efficiency of technologization of processes of processing of organic waste of livestock production. *Economics and Management*. 2019;(7):54–61. (In Russ.)
2. Savvateeva I.A., Druzyanova V.P. Electricity from biogas. *Actual issues of agrarian science*. 2020;(34):27–37. (In Russ.)
3. Bondarenko A.M., Kachanova L.S. Production of liquid concentrated organic fertilizers *Sel'skiy mekhanizator*. 2017;(11):30-31. (In Russ.)
4. Tarnizhevskiy B.V. Status and prospects for the use of non-traditional renewable energy sources in Russia. *Promyshlennaya Teploenergetika*. 2002;(1):231. (In Russ.)
5. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Fiapshev A.G. Development and study of bioreactor for application bio-fertilizers and biogas. *Vestnik of Kazan state agrarian university*. 2016;11(2):60–63. (In Russ.)
6. Apazhev A.K., Fiapshev B.A., Kumakhov A.A., Kilchukova O.Kh., Khamokov M.M. Utilization of animal husbandry waste with the production of biogas. *International Agricultural Journal*. 2022;65(5). (In Russ.)
7. Fiapshev A.G., Khamokov M.M., Kilchukova O.Kh., Temukuev B.B., Fiapshev B.A. Optimization of parameters and operation modes of a biogas plant for achieving the highest biomethane yield. *Energy-Safety and Energy-Economy*. 2021;(3):41–45. (In Russ.)

8. Khamokov M.M., Shekikhachev Yu.A., Alov V.Z., Kurasov V.S., Temukuev T.B. Productive and power efficiency of the use of biogas station. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University Scientific Journal of KubSAU*. 2012;(76):333–342. (In Russ.)

9. Stolyarov Yu.Yu. *Tekhnologiya i reologicheskiye svoystva vodnykh dispersnykh sistem* [Technology and rheological properties of aqueous disperse systems]: *diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.01, 05.13.01*. Moscow, 2005. 116 p. (In Russ.)

10. Kozhevnikov S.O. *Razrabotka smesitelya dlya peremeshivaniya zhidkikh i geterogennykh sred* [Development of a mixer for mixing liquid and heterogeneous media]: *dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.13*. Ivanovo: Izd-vo IGASA, 2005. 140 p. (In Russ.)

---

#### Сведения об авторах

**Фиапшев Амур Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 2111-4506, Author ID: 461209, Scopus ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

**Хамоков Марат Мухамедович** – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 3572-1415, Author ID: 668303, Scopus ID: 57205019878

**Кильчукова Олеся Хаугиевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus ID: 57205027117

**Фиапшев Батыр Амурович** – аспирант кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus ID: 58033451200

#### Information about the authors

**Amur G. Fiapshev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 2111-4506, Author ID: 461209, Scopus ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

**Marat M. Khamokov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 3572-1415, Author ID: 668303, Scopus ID: 57205019878

**Olesya Kh. Kilchukova** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus ID: 57205027117

**Batyr A. Fiapshev** – Postgraduate student of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus ID: 58033451200

---

**Авторский вклад.** Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

**Author's contribution.** All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

---

Статья поступила в редакцию 14.04.2023;  
одобрена после рецензирования 03.05.2023;  
принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 14.04.2023;  
approved after reviewing 03.05.2023;  
accepted for publication 10.05.2023.