

Научная статья
УДК 631.3.021
doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-120-126

Исследование тепловых процессов в биогазовой установке

Батыр Амурович Фиапшев

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030
fiapsh99@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0000-2743-2207>

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы математического моделирования тепловых процессов в биогазовых установках с целью повышения равномерности распределения температурного поля в биореакторе. При анаэробном сбраживании навоза и других сельскохозяйственных отходов можно получить биогаз, который позволит обеспечить до 25% потребности малых сельхозпотребителей в энергоносителях и ценные биоорганические удобрения. Такая переработка отходов является наиболее эффективным экологоориентированным мероприятием, обеспечивающим его обеззараживание, снижение загрязнения почвы, водных ресурсов и атмосферы загрязняющими веществами и патогенной флорой. Переработка сельскохозяйственных отходов в биогазовых установках – сложная задача, которая в настоящее время еще не решена в полной мере. Анализ результатов исследований эффективности процесса перемешивания и нагрева в конструкции биогазовых установок, теоретических и экспериментальных исследований по утилизации отходов сельскохозяйственного производства с выработкой биогаза и биоудобрений показал, что существующие способы нагрева и перемешивания не обеспечивают равномерный нагрев сбраживаемой массы. В связи с этим разработана технологическая схема биогазовой установки для нужд малых фермерских хозяйств, обеспечивающей однородность температурного поля, состоящей из метантенка, газгольдера, перемешивающего и нагревательного устройства, вспомогательного оборудования и аппаратуры контроля и автоматики. Температурная однородность перемешиваемой среды достигается при совмещении теплообменника и перемешивающего устройства в один узел таким образом, что верхние и нижние лопасти смещены относительно друг друга под углом 25-35°, а боковые лопасти расположены под углом 25-35° относительно горизонтальной плоскости биореактора. Проведённые исследования по математическому моделированию позволили определить экономичные режимы работы биогазовой установки.

Ключевые слова: биотехнология, биогазовая установка, метантенк, математическое моделирование, температурная однородность, перемешивание, переработка сельскохозяйственных отходов

Для цитирования. Фиапшев Б. А. Исследование тепловых процессов в биогазовой установке // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 4(46). С. 120–126. doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-120-126

Original article

Study of Thermal Processes in a Biogas Plant

Batyr A. Fiapshiev

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,
Russia, 360030
fiapsh99@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0000-2743-2207>

Abstract. The article considers the issues of mathematical modeling of thermal processes in biogas plants in order to increase the uniformity of the temperature field distribution in the bioreactor. With anaerobic fermentation of manure and other agricultural waste, it is possible to obtain biogas, which will provide up to 25% of the needs of small agricultural consumers in energy carriers and valuable bioorganic fertilizers. Such waste processing is the most effective eco-oriented measure, ensuring its disinfection, reducing pollution of soil, water resources and the atmosphere with pollutants and pathogenic flora. Processing of agricultural waste in biogas plants is a complex task that has not yet been fully solved. Analysis of the results of studies of the efficiency of the mixing and heating process in the design of biogas plants, theoretical and experimental studies on the utilization of agricultural waste with the production of biogas and biofertilizers showed that the existing methods of heating and mixing do not provide uniform heating of the fermented mass. In this regard, a process flow diagram of a biogas plant has been developed, ensuring uniformity of the temperature field, for the needs of small farms, consisting of a methane tank, a gas holder, a mixing and heating device, auxiliary equipment and control and automation equipment. Theoretical temperature uniformity of the mixed medium is achieved by combining the heat exchanger and the mixing device into one unit in such a way that the upper and lower blades are offset relative to each other at an angle of 25-350, and the side blades are located at an angle of 25-350 relative to the horizontal plane of the bioreactor. The conducted studies on mathematical modeling made it possible to determine the economical operating modes of the biogas plant.

Keywords: biotechnology, biogas plant, methane tank, mathematical modeling, temperature homogeneity, mixing, processing of agricultural waste

For citation. Fiapshv B.A. Study of Thermal Processes in a Biogas Plant. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;4(46):120–126. doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-120-126

Введение. Сельскохозяйственная биоэнергетика – одно из направлений эффективной переработки отходов сельскохозяйственного производства и навоза животноводческих предприятий, обеспечивающая получение подготовленных к непосредственному использованию высоко качественных органических удобрений и биологического газа, пригодного для использования в качестве топлива.

Установлено, что биогаз, получающийся в ходе этого процесса, представляет собой смесь из 65% метана, 30% углекислого газа, 1% сероводорода (H_2S) и незначительных количеств азота, кислорода, водорода и окиси углерода. Потенциальная энергия, заключенная в 28 м^2 биогаза, эквивалентна энергии $16,8 \text{ м}^3$ природного газа, $10,8 \text{ л}$ нефти или $18,4 \text{ л}$ дизельного топлива [1, 2].

Разработкой биоэнергетических систем утилизации навоза и получения биогаза занимаются почти во всех странах мира. Технологический процесс переработки навоза и получения биогаза осуществляется на биоэнергетических установках, отличающихся как по составу сооружений, оборудования, принципу действия, так и параметрам процесса.

Выбор параметров технологического процесса систем получения биогаза зависит от

вида и технологии содержания животных, природно-климатических условий, предъявляемых требований к сброженной массе и биогазу, санитарного состояния животноводческого предприятия, наличия сельскохозяйственных угодий, энергоисточников и др.

Перевод животноводства на промышленную основу влечет за собой резкое увеличение выхода навозных стоков, которые по одному объекту могут составлять от 250 до 3000 т в сутки, а затраты средств на строительство системы удаления и утилизация навоза достигают 30% от общих капитальных вложений на строительство комплекса.

Удаление, переработка и утилизация навоза и помета являются не только сложной народнохозяйственной, но и актуальной экологической проблемой. Вместе с тем из навоза и помета «при их соответствующей переработке» можно получить ценные исходные продукты: органические удобрения, биогаз, кормовые добавки [3–5].

Биоэнергетические установки, применяемые в течение длительного времени на птицеводческих предприятиях, показывают экономическую целесообразность получения биогаза как источника тепловой энергии. Например, на птицеферме мощностью 50 тыс.

кур-несушек полученный биогаз способен обеспечить выработку электроэнергии внутренних нужд фермы. Срок окупаемости биогазовых установок от 3 лет и выше.

Внедрение в производство биоэнергетических установок способствует решению трех важнейших проблем [6]:

- продовольственной – за счет подготовки высококачественного удобрения и его рационального использования;

- энергетической – за счет получения и рационального использования биогаза;

- экологической – за счет обеспечения обеззараживания и дезодорации жидкого навоза.

Создание эффективных экологически безопасных производств по переработке отходов сельского хозяйства и промышленности в органические компосты позволит значительно улучшить структуру почв. Поэтому серьезное внимание в научно-исследовательских работах по проблеме компостирования навоза и помета направлено на разработку эффективных технологий с использованием сельскохозяйственных и промышленных отходов, содержащих большое количество органического вещества.

При соответствующих условиях перспективен способ переработки навоза и птичьего помета в биогаз. Практический интерес к биогазовым установкам, отмечаемый в настоящее время во всем мире, объясняется тем, что данная технология подготовки отходов к использованию предусматривает комплексное решение основных проблем, связанных с охраной окружающей среды, получением органических удобрений и источников энергии [7].

Известно, что при проведении вычислительного эксперимента сначала для исследуемого объекта (биогазовой установки) строится модель, с помощью которой можно «проиграть» его поведение в различных условиях и выбрать наиболее выгодные и удобные параметры без проведения каких-либо дорогостоящих и часто опасных экспериментов. Затем разрабатываются вычислительные алгоритмы, составляются программы для их реализации и, наконец, выполняются соответствующие расчеты на ЭВМ. При этом особо важно построение эффективных вычислительных алгоритмов, позволяющих получить решение поставленной задачи с заданной точностью за минимальное количество действий [8].

При определении статистических характеристик непрерывных сигналов, получаемых в процессе различных экспериментов, необходимо отнести их к какому-либо классу случайных процессов, т. е. построить математическую модель тепловых процессов биогазовой установки. Основанием для построения такой модели является априорная информация, источником которой могут служить некоторые предварительные данные, точка зрения ведущих специалистов, мнение персонала, занимающегося проведением эксперимента и т. п. Эта информация может быть уточнена и дополнена в ходе проведения предварительных экспериментов.

Таким образом, основой вычислительного эксперимента является математическое моделирование, теоретической базой – прикладная математика, а технической – программное обеспечение электронных вычислительных машин. В историческом плане работы, как по математическому моделированию, так и по численным методам, начаты значительно раньше появления ЭВМ. Однако только лишь после массового производства таких мощных и доступных средств обработки информации, как персональные компьютеры, стало возможным их широкое внедрение в практику экспериментальных исследований, в особенности, при организации и проведении вычислительных экспериментов в различных областях науки и техники.

Цель исследования – повышение равномерности распределения температурного поля по всему объёму биореактора для увеличения выхода биогаза и улучшения качества получаемого биоудобрения путем оптимизации параметров и режимов работы теплообменника-мешалки биогазовой установки, проведённых с использованием математического моделирования тепловых процессов.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследование и анализ тепловых процессов, протекающих в разработанном биореакторе при работе теплообменника-мешалки (рис. 1), проведены с использованием математического моделирования, которые могут быть описаны уравнениями термодинамики.

Для проведения исследований по математическому моделированию было применено ПО Comsol Multiphysics. Были использованы: термодатчик ДТС-105-50М, измеритель регулятор микропроцессорный ТРМ 202, программное реле времени ВС-10-31У4.

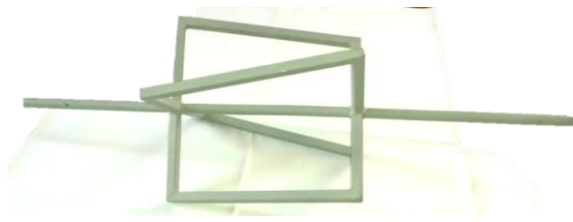


Рисунок 1. Схема теплообменника-мешалки
Figure 1. Heat exchanger-mixer diagram

Результаты исследования. В разработанном биореакторе произведено совмещение теплообменника и перемешивающего устройства в один узел таким образом, что верхние и нижние лопасти смещены относительно друг друга под углом 25-35°, а боковые лопасти расположены под углом 25-35° относительно горизонтальной плоскости биореактора [9].

Ее конструкция представляет собой вертикальный трубчатый вал с четырьмя лопастями. Эти же лопасти соединены между собой промежуточными лопатками, выполненными в виде прямоугольных труб, образуя при этом единую внутреннюю полость, в которой протекает вода сверху вниз. За счёт перемещения биомассы в горизонтальной и вертикальной плоскостях биореактора, по нашему мнению, увеличивается равномерность теплообмена и перемешивания, а также снижаются энергетические затраты.

Для проведения исследований по математическому моделированию была разработана геометрическая модель рассматриваемого биореактора в ПО Comsol Multiphysics (рис. 2).

Дифференциальное уравнение, описывающее тепловые процессы в установке согласно закону сохранения энергии, будет иметь вид:

$$\rho_{Г,Н} C_{Г,Н} \frac{\partial T_{Г,Н}}{\partial t} + \nabla q_{Г,Н} + \rho_{Г,Н} C_{Г,Н} u_{Г,Н} \nabla T_{Г,Н} = Q,$$

где:

- $\rho_{Г,Н}$ – плотность газа или навоза, кг/м³;
- $C_{Г,Н}$ – удельная теплоемкость газа или навоза, Дж/(кг·К);
- $T_{Г,Н}$ – температура газа или навоза, К;
- $q_{Г,Н}$ – тепловой поток обусловленный теплопроводностью среды, Вт/м²;
- $u_{Г,Н}$ – скорость газового потока, вызванная конвекцией или навоза в случае его перемешивания, м/с;
- Q – тепловыделение, Вт/м³.

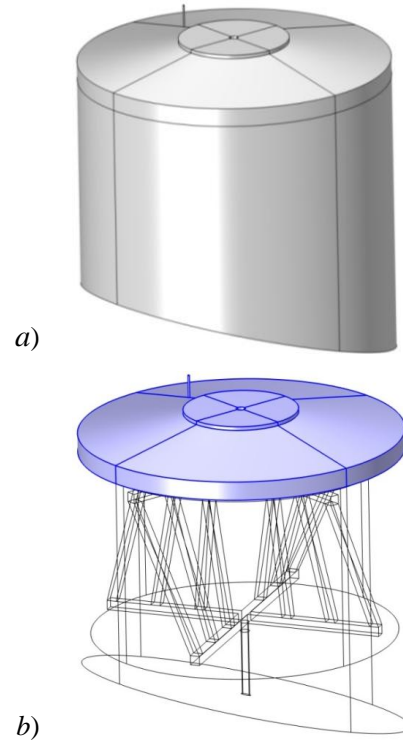


Рисунок 2. Изображение геометрической модели: *a* – биореактор; *b* – мешалка
Figure 2. Image of geometric model: *a* – bioreactor; *b* – mixer

Для дальнейшего моделирования тепловых процессов в установке с использованием граничных условий нами были определены средние скорости воды u_B в частях мешалки, имеющих геометрическое подобие и симметричное расположение. Данные значения скорости u_B использовались при расчете числа Re при нахождении теплового потока $q_{ВН}$ на поверхностях геометрической модели показанных на рисунке 3.

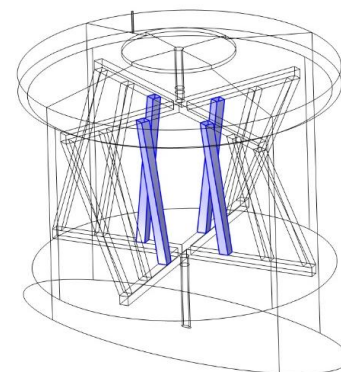


Рисунок 3. Изображение поверхностей мешалки, на которых было задано граничное условие
Figure 3. Image of the mixer surfaces where the boundary condition was specified

На рисунке 4 показаны плоскости геометрической модели, на которых были заданы граничные условия.

После проведенного выше математического описания тепловых процессов в установке,

а также задания соответствующих граничных условий на ее стенках, общий вид компьютерной модели тепловых процессов будет иметь вид:

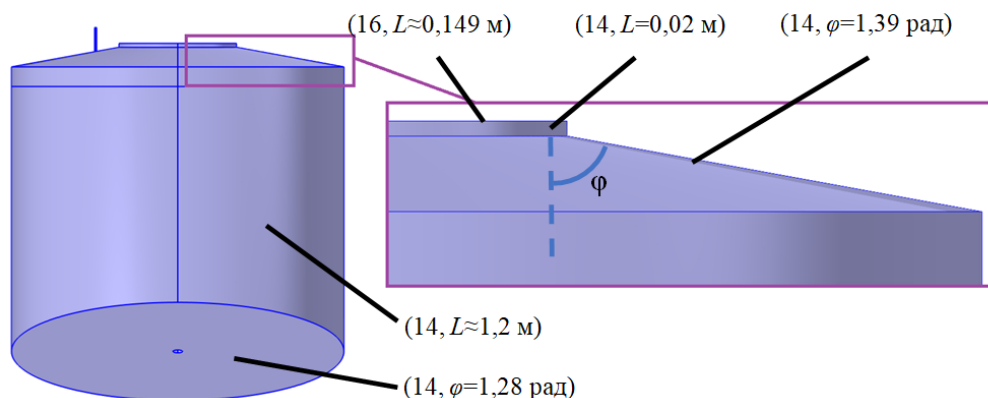


Рисунок 4. Изображение поверхностей установки, на которых были заданы соответствующие граничные условия описанные выше с указанием номера формулы и характерных размеров и углов
Figure 4. Image of the installation surfaces on which the corresponding boundary conditions described above were set, indicating the formula number and characteristic dimensions and angles

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{Г,Н} C_{Г,Н} \frac{\partial T_{Г,Н}}{\partial t} + \nabla q_{Г,Н} + \rho_{Г,Н} C_{Г,Н} u_{Г,Н} \nabla T_{Г,Н} = Q; \\ q_{Г,Н} = -k_{Г,Н} \nabla T_{Г,Н}; \\ \frac{\partial \rho_{Г}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{Г} u_{Г}) = 0; \\ \rho_{Г} \frac{\partial u_{Г}}{\partial t} + \rho_{Г} u_{Г} \nabla u_{Г} = \nabla(-pI + K) + \rho_{Г} g; \\ K = \mu_{Г} (\nabla u_{Г} + (\nabla u_{Г})^T) - \frac{2}{3} \mu_{Г} (\nabla u_{Г}) I; \end{array} \right\} \text{опред. темп. навоза и газа}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (\rho_{Н} v) = 0; \\ \rho_{Н} v \nabla v + 2 \rho_{Н} \Omega \times v = \nabla(-pI + \tau) + F - \rho_{Н} \Omega \times (\Omega \times r); \\ u_{Н} = v + \frac{\partial r}{\partial t}; \end{array} \right\} \text{опред. скорости навоза}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{ВН} = h(T_{В} - T_{Н}); \\ h = f(C_{В}, \mu_{В}, \rho_{В}, \mu_{ВН}, k_{В}, u_{В}, D); \end{array} \right\} \text{ГУ на поверх. "мешалка - навоз"}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n(-pI + \mu_{В} (\nabla u_{В} + (\nabla u_{В})^T)) = -p_{out} n; \end{array} \right\} \text{ГУ на поверх. выхода газа из установки}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{НО} = h(T_{Н} - T_{ОКР}); \\ h = f(C_{Г}, \mu_{Г}, \rho_{Г}, k_{Г}, L, \varphi); \end{array} \right\} \text{ГУ на поверхности "стенка - окружающая среда"}$$

Для компьютерного расчета методом конечных элементов была построена сетка, состоящая из 177 тысяч элементов и показанная на рисунке 5. Для расчета системы был использован ряд физических интерфейсов ПО Comsol Multiphysics. А именно, интерфейс «Laminar Flow» для расчета скоростей газа и навоза.

Предлагаемый вариант работы установки показан на рисунке 6 в виде диаграмм.

Он является экономичным вследствие периодической работы мешалки и подачи воды, но при этом разница между максимальной и минимальной температурами ΔT в установке может достигать 22°C, в особенности в пристеночной области.

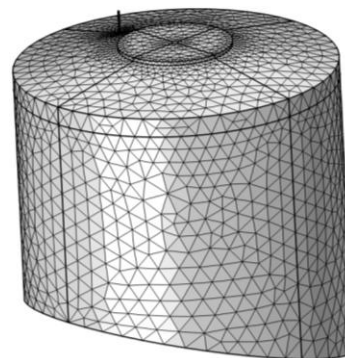


Рисунок 5. Общий вид расчетной сетки для определения тепловых полей в установке
Figure 5. General view of the calculation grid for determining thermal fields in the installation

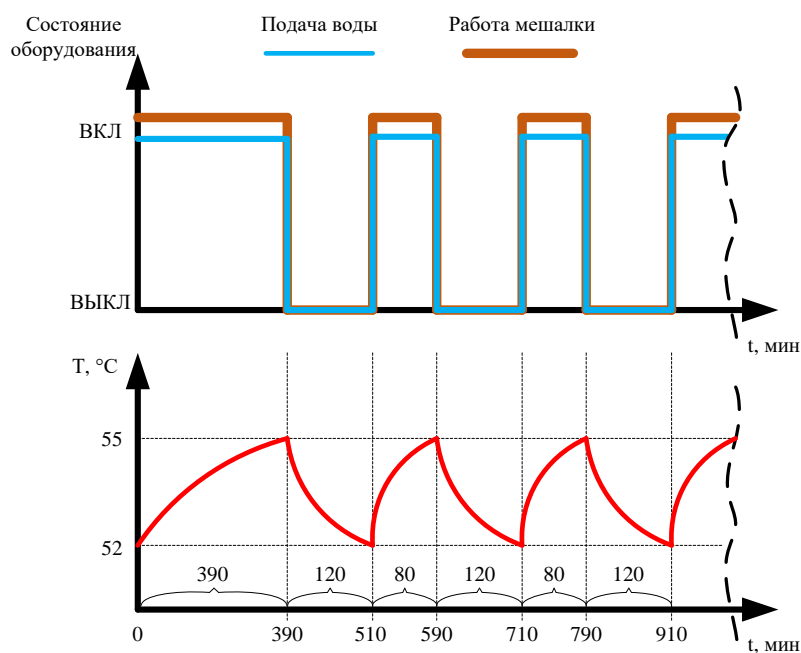


Рисунок 6. Диаграммы работы установки в экономичном режиме ($\Delta T \leq 22^\circ\text{C}$)
Figure 6. Diagrams of the plant operation in economy mode ($\Delta T \leq 22^\circ\text{C}$)

Выводы. Разработана компьютерная модель тепловых процессов в биогазовой установке, включающая в себя начальные и граничные условия, в которых заданы значения параметров на входных и выходных границах исследуемой геометрической области, а также учитывается теплоотдача с поверхности мешалки к навозу от скорости протекания горячей воды через нее, а также теплоотдача от стенок установки в окружающую среду, в зависимости от ее геометрической конфигурации.

На основании полученных результатов компьютерного моделирования был предло-

жен следующий режим работы установки. Первоначально производится нагрев навоза от 20°C до температуры 55°C в течении 390 минут с постоянным его перемешиванием (частота вращения 7 об/мин). После достижения заданной температуры и отключения работы установки может идти экономичным режимом – в течение 120 минут осуществляется его остывание до 52°C с последующим включением процесса перемешивания и нагрева до 55°C за 80 минут (при этом ΔT может достигать 22°C на удалении 5,5 см от стенок установки).

Список литературы

1. Дурдыбаев С. Д., Данилкина В. С. Рязанцев В. П. Утилизация отходов животноводства и птицеводства: Обзор. Москва: Агропромиздат, 1989, 56 с.
2. Бондаренко А. М., Качанова Л. С. Эффективность технологизации процессов переработки органических отходов животноводства // АПК: Экономика, управление. 2019. № 7. С. 54–61. DOI: 10.33305/197-54. EDN: UMUJZA
3. Скорб И. И. Анализ физико-механических свойств жидкого навоза // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 30-31 марта 2017 г. Минск: БГАТУ, 2017. С. 205–207.
4. Харченко С. Н. Эффективные режимы работы сушильной установки пчелиной перги с рациональными параметрами комбинированного нагрева: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2022. 128 с.
5. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Фиашев А. Г. Разработка и исследование биореактора для получения биоудобрения и биогаза // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 2(40). С. 60–63. DOI: 10.12737/20637. EDN: WHQVRL
6. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Электроэнергия из биогаза // Актуальные вопросы аграрной науки. 2020. № 34. С. 27–37. EDN: WWUGEE

7. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки для достижения максимального выхода биометана / А. Г. Фиапшев, М. М. Хамоков, О. Х. Кильчукова, Б. Б. Темукуев, Б. А. Фиапшев // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 3. С. 41–45. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-3-41-45. EDN: EZKGZU

8. Экологически чистые и ресурсосберегающие альтернативные системы энергоснабжения сельскохозяйственных предприятий Кабардино-Балкарской Республики / А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов. [и др.]. Нальчик, 2022. ISBN 978-5-89125-194-6

9. Патент № 174157 Российская Федерация МПК А01С 3/00(2006.01). Биореактор / А. Г. Фиапшев, О. Х. Кильчукова, А. К. Апажев, Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев, М. М. Хамоков, Л. Р. Керимова, А. Р. Тхагапсова, Б. А. Фиапшев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ. № 2017119040; заявл. 31.05.2017; опубл. 05.10.2017. Бюл. № 28.

References

1. Durdybaev S.D., Danilkina V.S., Ryazantsev V.P. *Utilizatsiya otkhodov zhivotnovodstva i ptitsevodstva: Obzor* [Utilization of livestock and poultry waste: Review]. Moscow: Agropromizdat, 1989, 56 p. (In Russ.)

2. Bondarenko A.M., Kachanova L.S. Efficiency of technologization of processes of processing of organic waste of livestock production. *APK: ekonomika, upravleniye*. 2019;(7):54–61. (In Russ.). DOI: 10.33305/197-54. EDN: UМУJZA

3. Skorb I.I. Analysis of physical and mechanical properties of liquid manure. *Peredovyye tekhnologii i tekhnicheskoye obespecheniye sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Minsk, 30-31 marta 2017 g.* [Advanced technologies and technical support of agricultural production: materials of the International scientific-practical. conf. Minsk, March 30-31, 2017]. Minsk: BGATU, 2017. Pp. 205–207. (In Russ.)

4. Kharchenko S. N. *Effektivnyye rezhimy raboty sushil'noy ustanovki pchelinoy pergi s ratsional'nymi parametrami kombinirovannogo nagreva: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Efficient operating modes of a bee bread drying plant with rational parameters of combined heating: dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. Krasnodar, 2022. 128 p. (In Russ.)

5. Apazhev A.K., SHEkihachev 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.). DOI: 10.12737/20637. EDN: WHQVRL

6. Savvateeva I.A., Druzyanova V.P. Electricity from biogas. *Aktual'nyye voprosy agrarnoy nauki*. 2020;(34):27–37. (In Russ.). EDN: WWUGEE

7. Fiapshev A.G., Hamokov M.M., Kil'chukova O.H., 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.). DOI: 10.18635/2071-2219-2021-3-41-45. EDN: EZKGZU

8. Apazhev A.K., SHEkihachev YU.A., Hazhmetov L.M. [et al.]. *Ekologicheski chistyye i resursosberegayushchiye al'ternativnyye sistemy energosnabzheniya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy Kabardino-Balkarskoy Respubliki* [Environmentally friendly and resource-saving alternative energy supply systems for agricultural enterprises of the Kabardino-Balkarian Republic]. Nalchik, 2022. (In Russ.). ISBN 978-5-89125-194-6.

9. Patent No. 174157 Russian Federation IPC A01C 3/00(2006.01). Bioreactor. A.G. Fiapshev, O.Kh. Kilchukova, A.K. Apazhev, L.M. Khazhmetov, Yu.A. Shekihachev, M.M. Khamokov, L.R. Kerimova, A.R. Tkha gapsova, B.A. Fiapshev; applicant and patent holder FGBOU VO Kabardino-Balkarian SAU. No. 2017119040; application 31.05.2017; published 05.10.2017. Bulletin No. 28. (In Russ.)

Сведения об авторе

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: 6490-4752, Scopus ID: 58033451200

Information about the author

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: 6490-4752, Scopus ID: 58033451200

Статья поступила в редакцию 20.11.2024;
одобрена после рецензирования 04.12.2024;
принята к публикации 12.12.2024.

The article was submitted 20.11.2024;
approved after reviewing 04.12.2024;
accepted for publication 12.12.2024.