

Научная статья

УДК 631.3.021

doi: 10.28983/asj.y2023i6pp115-121

### Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки

**Аслан Каральбиевич Апажев, Юрий Ахметханович Шекихачев, Вячеслав Барасбиевич Дзуганов, Луан Мухажевич Хажметов, Амур Григорьевич Фиапшев, Батыр Амурович Фиапшев**  
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова»,  
г. Нальчик, Россия  
e-mail: shek-fmep@mail.ru

**Аннотация.** В статье приведены результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров работы биогазовой установки оригинальной конструкции. Установлены значения температуры процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата, длительности его перемешивания, числа оборотов теплообменника-мешалки, при которых обеспечивается максимальный выход биоудобрения.

**Ключевые слова:** биогазовая установка; биогаз; многофакторный эксперимент; температура сбраживания; продолжительность перемешивания.

**Для цитирования:** Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Дзуганов В. Б., Хажметов Л. М., Фиапшев А. Г., Фиапшев Б. А. Оптимизация параметров и режимов работы биогазовой установки // Аграрный научный журнал. 2023. № 6. С. 115–121. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i6pp115-121>.

### AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

### Optimization of parameters and operating modes of a biogas plant

**Aslan K. Apazhev, Yuri A. Shekikhachev, Vyacheslav B. Dzukanov,  
Luan M. Khazhmetov, Amur G. Fiapshev, Batyr A. Fiapshev**  
Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik, Russia  
e-mail: shek-fmep@mail.ru

**Annotation.** The article presents the results of optimizing the design and regime parameters of the biogas plant of the original design. The values of the temperature of the process of thermophilic anaerobic digestion of the substrate, the duration of its mixing, the number of revolutions of the heat exchanger-mixer, at which the maximum yield of biofertilizer is ensured, have been established.

**Keywords:** biogas plant, biogas, multifactorial experiment, fermentation temperature, mixing time.

**For citation:** Apazhev A. K., Shekikhachev Yu. A., Dzukanov V. B., Khazhmetov L. M., Fiapshev A. G., Fiapshev B. A. Optimization of parameters and operating modes of a biogas plant. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(6):115–121. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i6pp115-121>.

**Введение.** При утилизации биомассы посредством анаэробной ферментации образуются биогаз, который используется для получения тепла при сжигании в комбинации с обычным жидким топливом, а также для получения электроэнергии (при сжигании в двигателе внутреннего сгорания, приводящем в движение генератор). Обработанный дегазированный навоз используется как удобрение [8].

Процесс преобразования биомассы в биогаз происходит в результате множества последовательных реакций, наиболее характерными фазами которого являются кислотогенная, связанная с образованием летучих жирных кислот, и метаногенная, – с использованием этих кислот и образованием метана. Каждая фаза процесса анаэробного разложения органических соединений осуществляется своей микрофлорой, для успешного развития каждой из них необходимы специфические условия. При пространственном разделении указанных фаз с созданием оптимальных условий для каждой





группы микроорганизмов достигается ускорение процесса метанообразования, а, следовательно, и увеличение производительности всего технологического процесса. По мнению многих специалистов, анаэробный процесс обработки навоза в метантенках рациональнее аэробного (в аэротенках). Так, например, процесс метанового сбраживания свиного жидкого навоза позволяет за 10–15 дней минерализовать 90...95 % содержащихся в нем органических веществ [1, 6].

Энергетическая ценность 1 м<sup>3</sup> биогаза, состоящего на 50% из метана, достигает 17,8 МДж, а при увеличении содержания метана до 70% его энергетический потенциал повышается до 25 МДж (усредненный показатель находится на уровне 21 МДж). Одновременно энергетическая ценность таких традиционных энергоносителей, как природный газ и жидкое топливо, в расчете на 1 м<sup>3</sup> и 1 кг составляет соответственно 34 и 42 МДж [4, 5].

Наиболее эффективно использовать биогаз для выработки электроэнергии. В этом случае полностью решается проблема равномерного использования биогаза. Тепло, образующееся в процессе трансформации энергии биогаза в электрическую, целесообразно использовать для поддержания на необходимом уровне температурного режима в биореакторе, подогрева воды и для других нужд. Наиболее рентабельной считается замена жидкого топлива биогазом. Затраты возмещаются сравнительно быстро, так как полученная из биогаза энергия, эквивалентная энергетической ценности 1 кг жидкого топлива, оказывается примерно на 30 % дешевле [3].

При проектировании биогазовой установки исходят из того, что от одной коровы массой 500 кг в сутки получают с навозом 4,8 кг сухого органического вещества, из которого при 30-суточной переработке в реакторе образуется 1,0–2,4 м<sup>3</sup> биогаза. Эквивалентное количество биогаза получают из навоза, производимого в течение суток девятью свиньями на откорме (живая масса одного животного – 60 кг) или пятью свиноматками.

Для получения биогаза можно также использовать отходы растениеводства (солома яровых и озимых злаковых культур, свекловичная и картофельная ботва, отходы переработки льна и др.). Выход биогаза, как известно, зависит от качества сырья, которое определяется химическим составом последнего.

При производстве биогаза из отходов растениеводства в некоторых случаях для обеспечения более высокой скорости метаногенеза необходима оптимизация соотношения C:N. Корректируется этот параметр внесением в утилизируемую биомассу отходов с высоким содержанием азота, например куриного помёта или свиного навоза.

Продолжительность процесса ферментации биомассы, в том числе и навоза, при участии естественного сообщества метаногенной микрофлоры в термофильных температурных условиях биогазовой установки – не менее 10 суток. В большинстве случаев в процесс метаногенеза протекает в течение 10–14 суток и больше. Максимальный выход биогаза на стадии наиболее интенсивного метаногенеза в значительной степени зависит от химического состава биомассы, который определяется видом животных, а следовательно, и получаемым ими рационом. Так, из 1 кг сухого вещества навозной биомассы, внесённой в реактор биогазовой установки, получают в среднем 0,4–0,6 м<sup>3</sup> биогаза.

Если учесть, что только 40–50 % сухого вещества навоза в процессе метаногенеза трансформируется в биогаз, то выход биогаза на 1 кг сухого вещества разложившейся биомассы составляет 0,8–1,0 м<sup>3</sup>. На биогазовых установках, работающих в производственных условиях, из 1 кг сухого вещества навоза крупного рогатого скота получают 0,2–0,5 м<sup>3</sup>, а из эквивалентной массы свиного навоза – 0,5–0,7 м<sup>3</sup> биогаза (реактор работает на термофильном температурном режиме). Из биомассы куриного помёта биогаза выходит больше, чем из навоза крупного рогатого скота и свиней.

С целью оптимизации условий метаногенеза в бродильных камерах используются механические и гидравлические перемешивающие устройства. Скорость движения субстрата при перемешивании не должна превышать 0,5 м/с. При более высоких скоростях происходит разрыв оболочек микробных клеток.

Несмотря на то, что технология анаэробного сбраживания навоза разработана достаточно полно, широкого применения на практике она не получила. Основным недостатком существующих в настоящее время установок является их низкая эффективность (время сбраживания велико, а выход биогаза мал).

При создании принципиально новых экологически чистых технологий и комплексов машин целесообразно использовать существующие в других отраслях науки и техники высокоэффективные технологии и технические средства с доработкой их применительно к конкретным условиям.



Цель исследований – обеспечение максимального выхода биоудобрения путем оптимизации параметров и режимов работы биогазовой установки.

**Методика исследований.** Исследования проведены с использованием методов математического моделирования, оптимизации технологических процессов и математической статистики.

Производственные испытания разработанной биогазовой установки согласно предложенной технологии проведены в крестьянском (фермерском) хозяйстве «Хьэмзэт» Кабардино-Балкарской Республики.

**Результаты исследований.** Результаты проведенных теоретических исследований [9, 10] позволили спроектировать и изготовить экспериментальную биогазовую установку (рис. 1) с объёмом метантенка 3,5 м<sup>3</sup>, работающего при термофильном режиме анаэробного сбраживания, в котором перемешивающее и нагревательное устройства объединены в один узел теплообменника-мешалку. Такое техническое решение позволяет нагревать всю массу субстрата, за счёт вращения теплообменника-мешалки [2, 7].

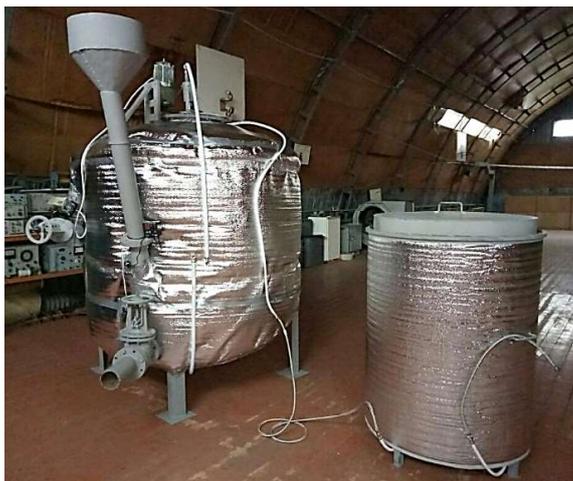


Рис. 1. Общий вид биогазовой установки

С целью установления оптимальных конструктивно-режимных параметров разработанной биогазовой установки проанализированы критерии эффективности работы, основные варьирующие факторы, после чего проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования проведены согласно матрицы планирования (табл. 1), предусматривающей 15 опытов при количестве факторов, равном 3.

Критерием эффективности работы биогазовой установки (параметром оптимизации) принят выход биоудобрений.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

$i$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_0^2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$Y_i$
1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	$Y_1$
2	1	1	-1	0	1	1	0	-1	0	0	$Y_2$
3	1	-1	1	0	1	1	0	-1	0	0	$Y_3$
4	1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	$Y_4$
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_5$
6	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	$Y_6$
7	1	1	0	-1	1	0	1	0	-1	0	$Y_7$
8	1	-1	0	1	1	0	1	0	-1	0	$Y_8$
9	1	-1	0	-1	1	0	1	0	1	0	$Y_9$
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{10}$
11	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	$Y_{11}$
12	1	0	1	-1	0	1	1	0	0	-1	$Y_{12}$
13	1	0	-1	1	0	1	1	0	0	-1	$Y_{13}$
14	1	0	-1	-1	0	1	1	0	0	1	$Y_{14}$
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{15}$

Теоретические исследования работы биогазовой установки показали, что на производительность по выходу биоудобрений оказывают факторы: температура процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата  $T_c$ ; длительность перемешивания субстрата  $t_{\Pi}$  и число оборотов теплообменника-мешалки  $n_T$  (табл. 2).

Таблица 2

Факторы и уровни их варьирования

Шаг и уровни варьирования факторов	Кодированное (безразмерное) значение факторов	Натуральное значение факторов		
		$X_1$ ( $T_c$ , град.)	$X_2$ ( $t_{\Pi}$ , мин)	$X_3$ ( $n_T$ , мин <sup>-1</sup> )
Шаг	–	3	3	0,5
Верхний	+1	60	20	8
Нулевой	0	57	17	7,5
Нижний	–1	54	14	7

Для установления оптимальных конструктивных параметров и режимов работы биогазовой установки, при которых возможно достижение максимального выхода биоудобрения 0,26 м<sup>3</sup>/сут., был проведен многофакторный эксперимент. На основании полученных данных для оценки влияния переменных факторов на выход биоудобрений были составлены уравнения регрессии, имеющие следующий вид:

$$Y_{Q_{\text{БГ}}} = 0,257 - 0,0061X_1 + 0,002X_2 - 0,0124X_3 - 0,0015X_1X_2 + 0,001X_2X_3 - 0,0239X_1^2 - 0,0152X_2^2 - 0,0254X_3^2. \quad (1)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии (1) согласно критерия Фишера показала, что оно описывает исследуемый процесс адекватно ( $F_{\text{расч}} = 0,765 < F_{\text{табл}} = 2,359$ ).

В раскодированном уравнение регрессии (1) имеет вид

$$Q_{\text{БГ}} = 0,257 - 0,0061\left(\frac{T_{\Pi} - 57}{3}\right) + 0,002\left(\frac{t_{\Pi} - 17}{3}\right) - 0,0124\left(\frac{n_T - 7,5}{0,5}\right) - 0,0015\left(\frac{T_{\Pi} - 57}{3}\right)\left(\frac{t_{\Pi} - 17}{3}\right) + 0,001\left(\frac{t_{\Pi} - 17}{3}\right)\left(\frac{n_T - 7,5}{0,5}\right) - 0,0239\left(\frac{T_{\Pi} - 57}{3}\right)^2 - 0,0152\left(\frac{t_{\Pi} - 17}{3}\right)^2 - 0,0254\left(\frac{n_T - 7,5}{0,5}\right)^2. \quad (2)$$

В результате некоторых преобразований получим:

$$Q_{\text{БГ}} = -8,7881 + 0,1022T_{\Pi} + 0,0474t_{\Pi} + 1,5375n_T + 0,0001T_{\Pi}t_{\Pi} + 0,0007t_{\Pi}n_T - 0,001T_{\Pi}^2 - 0,0017t_{\Pi}^2 - 0,1016n_T^2. \quad (3)$$

С целью установления оптимальных значений основных факторов, которые обеспечат наибольший выход биогаза, на основании уравнения (1) составлена система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dY_{Q_{\text{БГ}}}}{dt} = -0,0061 - 0,0015X_2 - 0,0479X_1 = 0 \\ \frac{dY_{Q_{\text{БГ}}}}{dt} = 0,002 - 0,0015X_1 + 0,001X_3 - 0,0304X_2 = 0. \\ \frac{dY_{Q_{\text{БГ}}}}{dt} = -0,0124 + 0,001X_2 - 0,0508X_3 \end{cases} \quad (4)$$



Решения данной системы уравнений являются оптимальными значениями основных факторов в кодированном виде

$$X_1 = -0,1217; X_2 = 0,06; X_3 = 0,2422.$$

После раскодировки получим реальные оптимальные значения основных факторов: температура процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата 54,4 °С; длительность перемешивания субстрата 17,2 мин; число оборотов теплообменника-мешалки  $n_T = 7,6 \text{ мин}^{-1}$ .

Эксплуатация разработанной биогазовой установки с учетом полученных оптимальных значений конструктивно-режимных параметров обеспечивают получение максимального выхода биогаза в объеме 0,26 м<sup>3</sup>/сут.

Воспроизводимость эксперимента проверена согласно критерия Кохрена, для чего установили его расчетное значение по выражению

$$G_{расч} = S^2(y_i)_{MAX} / \sum_{i=1}^N S^2(y_i) = 0,241.$$

Таким образом, так как  $G_{расч} = 0,241 < G_{табл} = 0,335$ , можно заключить, что гипотеза об однородности дисперсий подтверждается

Уравнение регрессии при нулевом уровне температуры сбраживания ( $T_{II} = 57 \text{ °C}$ ) имеет следующий вид:

$$Q_{БГ} = -6,2117 + 0,0531t_{II} + 1,5375n_T + 0,0007t_{II}n_T - 0,0017t_{II}^2 - 0,1016n_T^2. \quad (5)$$

Поверхность отклика, характеризующего выход биогаза в зависимости от изменения длительности перемешивания субстрата и числа оборотов теплообменника-мешалки, приведена на рис. 2.

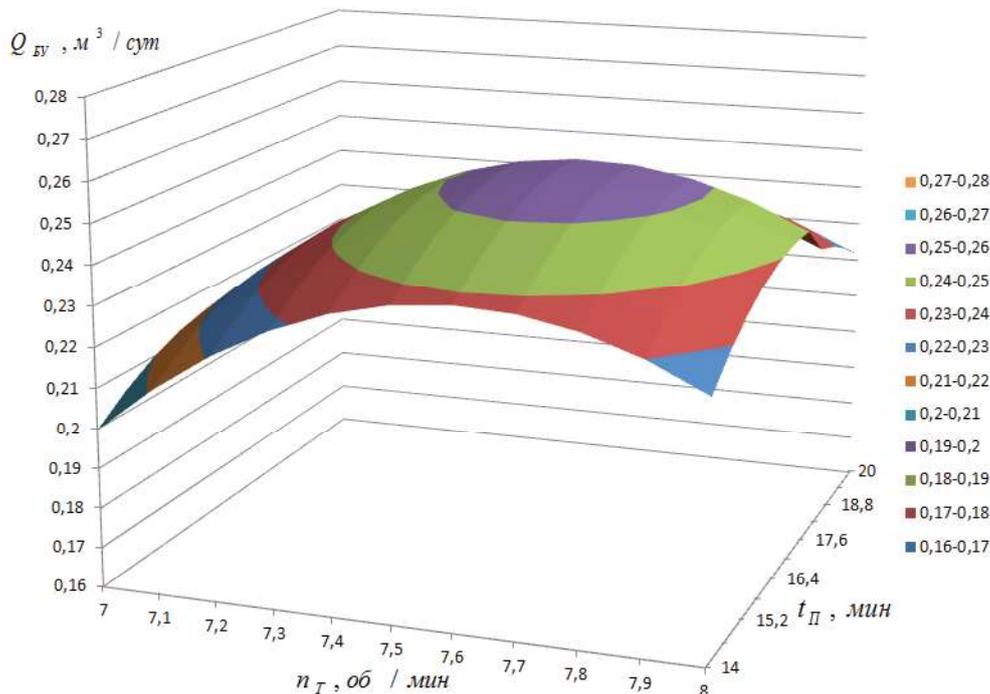


Рис. 2. Поверхность отклика  $f(T_{II}, n_T)$  при нулевом уровне  $T_{II} = 57 \text{ °C}$

Уравнение регрессии при нулевом уровне длительности перемешивания субстрата ( $t_{II} = 17 \text{ мин}$ ) имеет следующий вид:

$$Q_{БГ} = -8,4736 + 0,1032T_{II} + 1,5494n_T - 0,001T_{II}^2 - 0,1016n_T^2. \quad (6)$$

Поверхность отклика, характеризующего выход биогаза в зависимости от изменения температуры процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата и числа оборотов теплообменника-мешалки, показана на рис. 3.



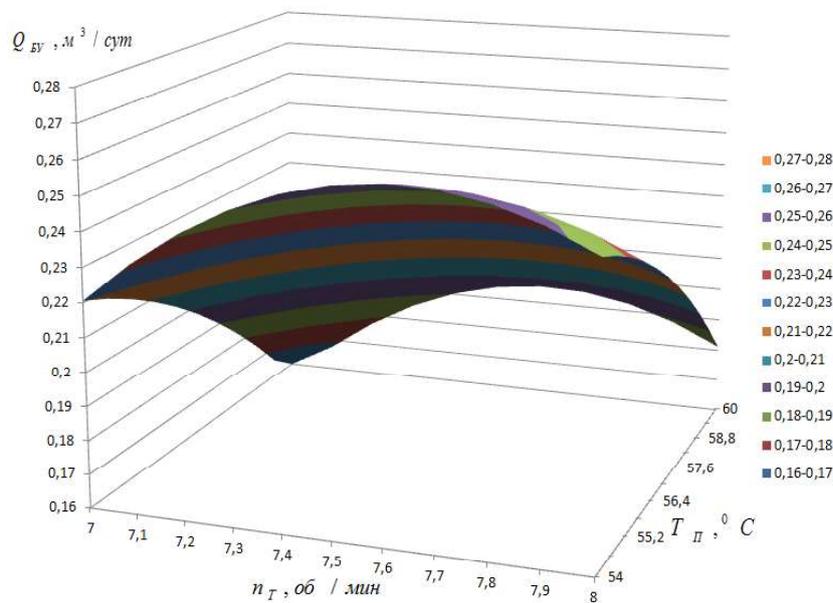


Рис. 3. Поверхность отклика  $f(T_{II}, n_T)$  при нулевом уровне  $t_{II} = 17$  мин

Уравнение регрессии при нулевом уровне числа оборотов теплообменника-мешалки ( $n_T = 7,5 \text{ мин}^{-1}$ ) имеет вид

$$Q_{BV} = -2,9719 + 0,1022T_{II} + 0,0526t_{II} + 0,0001T_{II}t_{II} - 0,001T_{II}^2 - 0,0017t_{II}^2. \quad (7)$$

Поверхность отклика, характеризующего выход биогаза в зависимости от изменения температуры процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата и длительности перемешивания субстрата, показана на рис. 4.

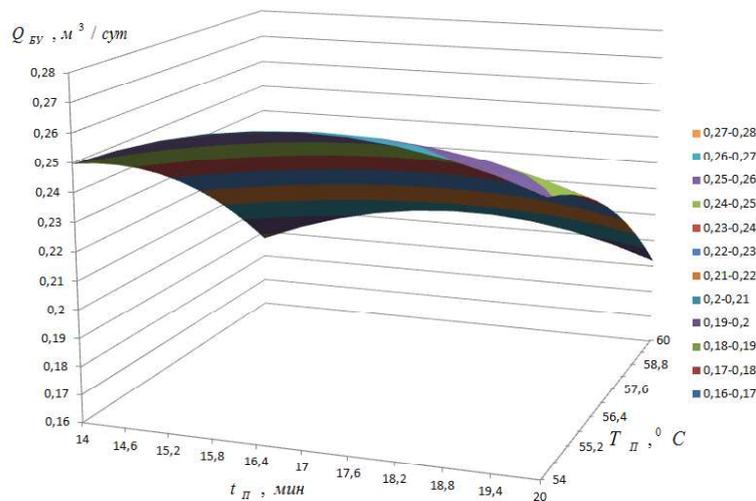


Рис. 4. Поверхность отклика  $f(T_{II}, t_{II})$  при нулевом уровне  $n_T = 7,5 \text{ мин}^{-1}$

**Заключение.** Максимальный выход биоудобрения ( $0,26 \text{ м}^3/\text{сут.}$ ) обеспечивается при следующих оптимальных конструктивно-режимных параметрах разработанной биогазовой установки: температура процесса термофильного анаэробного сбраживания субстрата и  $T_{II} = 54,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ; длительность перемешивания субстрата  $t_{II} = 17,2 \text{ мин}$ ; число оборотов теплообменника-мешалки  $n_T = 7,6 \text{ мин}^{-1}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов Р.А., Цыганков Б.К., Бегдай С.Н., Кириченко А.С. Перспективы использования возобновляемых источников энергии // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 42. С. 185–189.
2. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Фиापшев А.Г. Разработка и исследование биореактора для получения биоудобрения и биогаза // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. №.2(40). С. 60–63.
3. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А. инновационные технологии и техника утилизации отходов животноводства // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2021. № 3 (33). С. 79–83.

4. Гайфуллин И.Х., Рудаков А.И., Шогенов Ю.Х. Производство электроэнергии на основе переработки навоза в анаэробных условиях // Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Института механизации и технического сервиса. 2019. С. 71-77.

5. Гайфуллин И.Х., Зиганшин Б.Г., Рудаков А.И., Шогенов Ю.Х. Расчет технологических параметров и обоснование конструкции мобильной биогазовой установки // Современные достижения аграрной науки: Научные труды всерос. (национальной) науч.-практ. конф., посвящ. памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Хазипа Сабировича. Казань, 2021. С. 41–47.

6. Григораш О.В., Квитко А.В., Кошко А.Р. Перспективы и особенности работы биогазоустановок // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2015. № 108. С. 1147–1163.

7. Пат. 174157 РФ, МПК<sup>7</sup> А 01 С 3/00. Биореактор / А.К. Апажев, А.Г. Фиапшев, О.Х. Кильчукова, М.М. Хамоков, Ю.А. Шекихачев, Л.М. Хажметов, М.М. Хамоков, Л.Р. Керимова, А.Р. Тхагапсова, Б.А. Фиапшев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ. №2017119040; заявл. 31.05.17; опубл. 05.10.2017, Бюл. №28. 10 с. : ил.

8. Шогенов Ю.Х., Гайфуллин И.Х. Потенциал использования биогаза в регионах аграрной специализации // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы: Труды III Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 204–209.

9. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Fiapshev A.G., Kilchukova O.Kh. Thermal Processes in a Biogas Plant for the Disposal of Agricultural Waste // International scientific and practical conference «AgroSMART - Smart solutions for agriculture», KnE Life Sciences. 2019. P. 40-50. DOI 10.18502/cls.v4i14.5578. URL: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Life/article/view/5578>.

10. Fiapshev A., Kilchukova O., Shekikhachev Y., Khamokov M., Khazhmetov L. Mathematical model of thermal processes in a biogas plant // MATEC Web of Conferences. 2018. 212. 01032. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201032>. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205029899>.

#### REFERENCES

1. Amerkhanov R.A., Tsygankov B.K., Begdai S.N., Kirichenko A.S. Prospects for the use of renewable energy sources. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2013; 42: 185–189.

2. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Fiapshev A.G. Development and research of a bioreactor for obtaining biofertilizer and biogas. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2016; 2(40): 60–63.

3. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A. innovative technologies and equipment for the utilization of animal waste. *Proceedings of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2021; 3 (33):79–83.

4. Gaifullin I.Kh., Rudakov A.I., Shogenov Yu.Kh. Production of electricity based on manure processing under anaerobic conditions. *Current state, problems and prospects for the development of mechanization and technical service of the agro-industrial complex*. Materials of the international scientific-practical conference of the Institute of mechanization and technical service. 2019: 71–77.

5. Gaifullin I.Kh., Ziganshin B.G., Rudakov A.I., Shogenov Yu.Kh. Calculation of technological parameters and justification of the design of a mobile biogas plant. *Modern achievements of agrarian science*. Scientific works of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the memory of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Academician of the Academy of Agricultural Education, laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology, Honored Inventor of the USSR Gainanov Khazip Sabirovich. Kazan, 2021: 41–47.

6. Grigorash O.V., Kvitko A.V., Koshko A.R. Prospects and features of the work of biogas plants. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific journal of KubSAU)*. 2015; 108: 1147–1163.

7. Пат. 174157 РФ, МПК<sup>7</sup> А 01 С 3/00. Биореактор / А.К. Апажев, А.Г. Фиапшев, О.Х. Кильчукова, М.М. Хамоков, Ю.А. Шекихачев, Л.М. Хажметов, М.М. Хамоков, Л.Р. Керимова, А.Р. Тхагапсова, Б.А. Фиапшев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ. №2017119040; заявл. 31.05.17; опубл. 05.10.2017, Бюл. № 28. 10 с.: ил.

8. Shogenov Yu.Kh., Gaifullin I.Kh. The potential of biogas use in the regions of agricultural specialization // *Agrarian science of the XXI century. Actual research and prospects*. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. 2019: 204–209.

9. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Fiapshev A.G., Kilchukova O.Kh. Thermal Processes in a Biogas Plant for the Disposal of Agricultural Waste. International scientific and practical conference “AgroSMART - Smart solutions for agriculture”, KnE Life Sciences. 2019: 40-50. DOI 10.18502/cls.v4i14.5578. URL: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Life/article/view/5578>.

10. Fiapshev A., Kilchukova O., Shekikhachev Y., Khamokov M., Khazhmetov L. Mathematical model of thermal processes in a biogas plant. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 212: 01032. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201032>. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205029899>.

*Статья поступила в редакцию 12.11.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принята к публикации 1.02.2023.  
The article was submitted 12.11.2022; approved after reviewing 17.01.2023; accepted for publication 1.02.2023.*

