Тип статьи: научная
УДК 631.862.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-5-46-55

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОРЕАКТОРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

Юрий Александрович Киров [1]***, Виктор Юрьевич Копытин*** [2]***,***
Александр Владимирович Петушков [3]
[1,2,3] *Самарский государственный аграрный университет,*
Самарская область, г. Кинель, Россия
[1]kirov.62@mail.ru https://orcid.org/0009-0007-7299-9158
[2]kopytin.viktor1999@mail.ru, [3]3945688@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Юрий Александрович Киров, kirov.62@mail.ru
Corresponding author: Yuri Kirov, kirov.62@mail.ru

Реферат. *Повторное использование побочных продуктов животноводства позволяет увеличить рентабельность сельскохозяйственного предприятия и улучшить экологическую обстановку вокруг него. Одним из способов переработки органических отходов является анаэробное сбраживание с получением биогаза. Анализ распространенных конструкций систем перемешивания биогазовых установок показал, что их общими недостатками являются: повышенный риск разгерметизации из-за наличия движущихся частей в биореакторе и их уплотнений; значительные временные затраты на соблюдение технологии; при секционном исполнении биореактора используется несколько насосов. Разработана автоматизированная система гидравлического перемешивания для экспериментального образца биогазовой установки, включающая в себя: насос рециркуляционный, трубопроводы всасывающий и нагнетательный, временные реле, электромагнитные клапаны подачи воды, манометры, задвижки. Влияние технологических параметров системы гидравлического перемешивания на интенсивность процесса газообразования исследовали. Получено уравнение регрессии для определения влияния длительности и частоты перемешивания на эффективность процесса переработки побочных продуктов животноводства. Установлено, что в выбранном интервале процесс газообразования по результатам данного многофакторного эксперимента прямо пропорционально зависит от частоты перемешивания перерабатываемого субстрата. Для поддержания стабильной и эффективной работы биогазовой установки предложено периодическое перемешивание сбраживаемой массы длительностью 10 минут каждые 4 часа. Данные технологические параметры позволяют более эффективно обеспечивать предотвращение образования плавающей корки и осадка, участков разной температуры и pH внутри метантенка, а также способствуют равномерному распределению популяции бактерий в объёме биореактора.*

Ключевые слова: *вторичные продукты животноводства, утилизация, анаэробное сбраживание, биореактор, органические удобрения, биогаз, двухфакторный эксперимент.*

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A BIOREACTOR FOR PROCESSING ANIMAL BY-PRODUCTS

Yuri Kirov [1]***, Viktor Kopytin*** [2]***, Alexander Petushkov*** [3]
[1,2,3] *Samara State Agrarian University, Samara region, Kinel, Russia*
[1]kirov.62@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-6736-1263
[2]kopytin.viktor1999@mail.ru, [3]3945688@mail.ru

Abstract. *Reusing livestock by-products can increase the profitability of an agricultural enterprise and improve the environmental situation around it. One of the ways to process organic waste is anaerobic digestion to produce biogas. An analysis of common designs of biogas plant mixing systems*

showed that their common disadvantages are: increased risk of depressurization due to the presence of moving parts in the bioreactor and their seals; significant time costs to comply with the technology; with a sectional bioreactor, several pumps are used. An automated hydraulic mixing system has been developed for an experimental sample of a biogas plant, including: a recirculation pump, suction and discharge pipelines, time relays, solenoid valves for water supply, pressure gauges, valves. The influence of technological parameters of the hydraulic mixing system on the intensity of the gas formation process was studied. A regression equation was obtained to determine the influence of the duration and frequency of mixing on the efficiency of the process of processing livestock by-products. It has been established that in the selected interval the process of gas formation, according to the results of this multifactorial experiment, is directly proportional to the frequency of mixing of the processed substrate. Periodic stirring of the fermented mass for 10 minutes every 4 hours is proposed to maintain stable and efficient operation of the biogas plant. These technological parameters make it possible to more effectively prevent the formation of floating crust and sediment, areas of different temperatures and pH inside the digester, and also contribute to the uniform distribution of the bacterial population in the volume of the bioreactor.

Keywords: *secondary animal products, recycling, anaerobic digestion, bioreactor, organic fertilizers, biogas, two-factor experiment.*

Для цитирования: Киров Ю.А., Копытин В.Ю., Петушков А.В. Результаты экспериментальных исследований биореактора для обработки вторичных продуктов животноводства // Наука в центральной России. 2023. Т. 65, № 5. С. 46-54. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-46-54.

For citation: Kirov Yu., Kopytin V., Petushkov A. Results of experimental studies of a bioreactor for processing secondary animal products. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 65(5): 46-54. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-46-54.

Введение. Проблемы, которые связаны с рациональным использованием природных ресурсов и ростом отходов, в том числе и побочных продуктов животноводства, с течением времени требуют всё большего внимания. Учёными предлагаются и совершенствуются различные решения, которые способствуют улучшению экологической обстановки. Например, в сельском хозяйстве можно выделить несколько основных подходов к переработке органических отходов: компостирование, анаэробное сбраживание, термохимическая газификация [1,2,3,4].

Биогазовые технологии представляют собой комплексное решение, при относительно быстрой утилизации биоотходов, они позволяют получить из них эффлюент – высококачественное органическое удобрение и биогаз – альтернативный источник энергии. В удобрениях, которые получаются в ходе термофильного режима ферментации, отсутствуют специфические запахи, нитриты, болезнетворная микрофлора и семена сорняков. Биогаз можно использовать, не только в качестве альтернативного источника энергии, но и как факельное отопление или освещение теплиц и помещений, попутно увлажняя воздух за счёт образования воды, при сгорании метана и углекислого газа. Обширный спектр конструктивных и технологических параметров биореакторов позволяет подобрать наиболее оптимальное решение для сельскохозяйственного предприятия с учётом особенностей производства и скорректировать его в процессе эксплуатации. Доказано, что при изменении способа и режимов перемешивания возможно увеличить интенсивность газообразования и сократить время переработки примерно до 30% [5,6,7].

Цель – провести экспериментальные исследования для определения оптимальных параметров режима работы гидравлической системы перемешивания опытного образца биогазовой установки.

Материалы и методы. Для стабильного протекания реакции анаэробного сбраживания и эффективного процесса переработки органических отходов необходимо строгое соблюдение технологии и правильный подбор сырья, особенно при термофильном режиме протекания процесса [8].

Перемешивание перерабатываемого субстрата способствует интенсификации газообразования и улучшению качества получаемой биомассы, так как процесс перемешивания: уменьшает вероятность образования осадка и плавающей корки; способствует высвобождению пузырьков

образованного биогаза и равномерному распределению температурного градиента и популяция бактерий по всей площади перерабатываемого субстрата в биореакторе [9,10].

Полученные результаты анализа различных источников информации и патентный поиск позволили выделить ряд недостатков, которые объединяют большинство систем перемешивания биореакторов:

- повышенный риск разгерметизации из-за наличия движущихся частей в биореакторе и их уплотнений;
- значительные временные затраты на соблюдение технологии переработки органических отходов в биогазовых установках;
- при секционном исполнении биореактора используется два и более насоса для осуществления перемешивания [7,8,10,11].

Разработанная система автоматизированного гидравлического перемешивания (рисунок 1) решает вышеуказанные проблемы и включает в себя: насос рециркуляционный 1, соединённый с помощью трубопровода всасывающего 2 и трубопровода нагнетательного 3 с секцией метантенка многосекционного биореактора 4, временные реле 5 для управления электромагнитными клапанами подачи воды 6, манометры 7, которые установлены на всасывающем трубопроводе 2 и нагнетательном трубопроводе 3 и задвижки 9, которые обеспечивают возможность осуществления принудительного перемешивания при выходе из строя электромагнитных клапанов подачи воды 6 или аварийного слива перерабатываемой биомассы из секции метантенка многосекционного биореактора 4 [12,13].

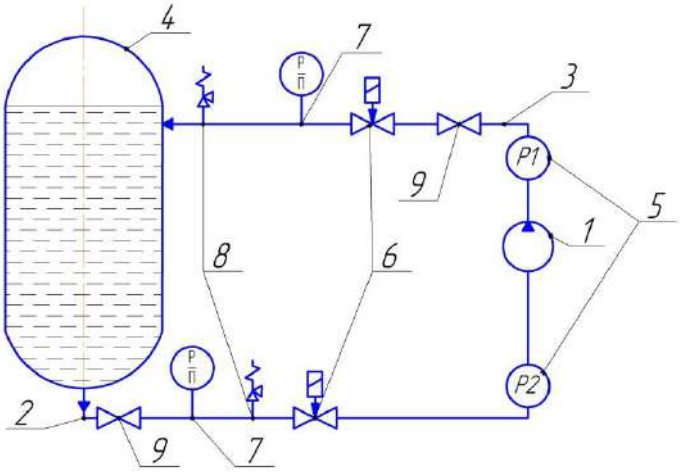

Рисунок 1 - Система автоматизированного гидравлического перемешивания: 1 - насос рециркуляционный; 2 - трубопровод всасывающий; 3 - трубопровод нагнетательный; 4 - секция метантенка многосекционного биореактора; 5 - временное реле; 6 - электромагнитный клапан подачи воды; 7 - манометр; 8 - предохранительный клапан;9 – задвижки

Система автоматизированного гидравлического перемешивания биогазовой установки работает следующим образом: исходный объём жидкой биомассы влажностью W=92…98% циркулирует по системе с помощью рециркуляционного насоса 1 по всасывающему трубопроводу 2 и нагнетательному трубопроводу 3. Отверстие всасывающего трубопровода 2 расположено в нижней части днища по центру, а отверстие нагнетательного трубопровода 3 в секции метантенка многосекционного биореактора 4 находится незначительно ниже верхней точки поверхности зеркала перерабатываемого субстрата и смещенно вбок относительно центра секции метантенка 4. С помощью временных реле 5 и электромагнитных клапанов подачи воды 6 происходит управление рециркуляционным насосом 1, то есть задаётся продолжительность и частота перемешивания. Давление в системе перемешивания контролируется манометрами 7, которые при выходе из строя элементов системы перемешивания или других непредвиденных ситуаций (показания давления выше/ниже критических), подают сигнал на управляющее устройство. При

превышении допустимого давления срабатывают предохранительные клапаны 8. Для реализации ручного режима управления системой перемешивания при выходе из строя электромагнитных клапанов подачи воды 6 или временных реле 5 на всасывающем трубопроводе 2 и нагнетательном трубопроводе 3 установлены задвижки 9.

Исследования проводились по следующей методике:

1. приготовление субстрата необходимой влажности;
2. загрузка подготовленной биомассы в секции биореактора;
3. обеспечение заданных технологическим процессов параметров;
4. снятие показаний протекания процесса;
5. обработка экспериментальных данных;
6. оценка адекватности результатов исследований;
7. обоснование и выбор оптимальных параметров системы гидравлического перемешивания опытного образца мобильной биогазовой установки.

В качестве сырья для опытного образца биогазовой установки использовался измельченный подстилочный навоз КРС влажностью W=92…98%.

Результаты и их обсуждение. Для выявления уровня влияния технологических параметров системы гидравлического перемешивания на интенсивность процесса газообразования при переработке органических отходов в биогазовой установке была принята двухфакторная модель регрессии (рисунок 2) [14,15]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (1)$$

где x_i – значения факторов; b_0 – свободный член, равный выходу процесса при x=0; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие на влияние того или иного фактора на изучаемый процесс.

При исследовании влияния длительности и частоты перемешивания на процесс анаэробного сбраживания были выбраны пределы: для длительности – 5 мин - 10 мин, частоты перемешивания – 1 - 6 раз в сутки.

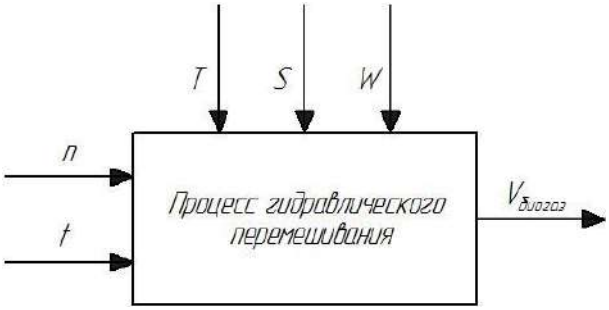

Рисунок 2 - Структурная схема объекта исследования: n – частота перемешивания, сут$^{-1}$; t – длительность перемешивания, мин; T – колебание температуры процесса, ^{0}C; S – состав субстрата, %; W – влажность субстрата, %; $V_{биогаз}$ – выход биогаза, л

Заполнена рабочая матрица двухфакторного ПФЭ (таблица 1).

Таблица 1 - матрица планирования двухфакторного ПФЭ

Уровень факторов	Кодированное значение факторов	Натуральное значение факторов	
		Длительность	Перемешивание
Нижний	-1	5	1
Верхний	+1	10	6
Основной	0	7,5	3,5
Интервал	1	2,5	2,5

Далее подготовили и заполнили матрицу планирования и обработки результатов двухфакторного ПФЭ (таблица 2).

Таблица 2 - матрица планирования и обработки результатов двухфакторного ПФЭ

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат			Выходной пар-р	y1	y2
	z1	z2	x0	x1	x2	y ср		
1	5	1	1	-1	-1	424,5	421	428
2	10	1	1	1	-1	433,5	432	435
3	5	6	1	-1	1	679	682	676
4	10	6	1	1	1	726	724	728

Так как расчётное значение Кохрена меньше табличного (0,4455 < 0,9065), гипотеза об однородности дисперсии принимается.

После определения коэффициентов и проверки их значимости по критерию Стьюдента (таблица 3) записано уравнение математической модели:

$$V_{биогаз} = 565,75 + 14x_1 + 136,75x_2 + 9,5x_1x_2 . \quad (2)$$

Таблица 3 - Расчёт коэффициентов и проверка их значимости по критерию Стьюдента

Коэффициент	Значение коэф-та	Расчётное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента	Примечание
b_0	565,75	431,5372	2,77645	Все коэффициенты значимы
b_1	14	10,67878	2,77645	
b_2	136,75	104,3088	2,77645	
b_{12}	9,5	7,246316	2,77645	

Следующим этапом является заполнение расширенной матрицы планирования и обработки результатов двухфакторного ПФЭ (таблица 4)

Таблица 4 - расширенная матрица планирования и обработки результатов двухфакторного ПФЭ

№	x1	x2	x1x2	y1	y2	$\bar{y}$	$S^2\{\tilde{y}_1\}$	$\hat{y}$
1	-1	-1	1	421	428	424,5	24,5	424,5
2	1	-1	-1	432	435	433,5	4,5	433,5
3	-1	1	-1	682	676	679	18	679
4	1	1	1	724	728	726	8	726

Все коэффициенты значимы, поэтому в данном случае проверка по критерию Фишера нецелесообразна (деление на ноль – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии равно четырём), но так как расчётные значения в столбце $\hat{y}$ равны значениям в столбце $\bar{y}$, то гипотеза об адекватности математической модели подтверждается.

Для раскодирования уравнения 2 значения «x» были заменены на натуральные значения. После выполнения необходимых расчётов, получено выражение (3) и поверхность функции отклика (рисунок 3) [15]:

$$V_{биогаз} = 372,2 + 0,28z_1 + 43,3z_2 + 1,52z_1z_2, \quad (3)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что частота перемешивания оказывает наибольшее влияние на интенсивность газообразования.

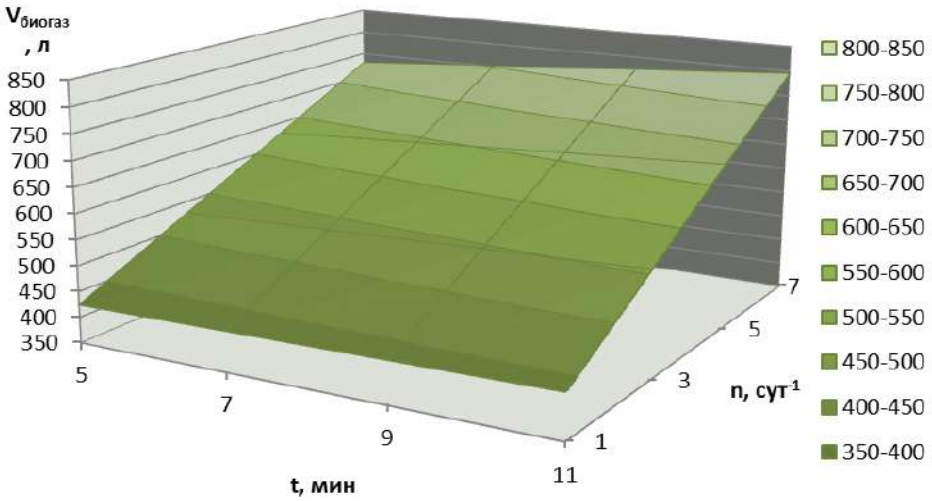

Рисунок 3 - График поверхности отклика зависимости интенсивности газообразования от длительности и частоты перемешивания перерабатываемого субстрата

Анализируя поверхность отклика (рисунок 3) можно сделать вывод, что наименьший выход биогаза составил при частоте перемешивания 1 раз в сутки длительностью 5 мин, а наибольший – 7 раз в сутки по 11мин.

Для более наглядного представления зависимости влияния исследуемых величин на интенсивность процесса газообразования построены графические зависимости (рисунок 4 и 5) по уравнению регрессии (3).

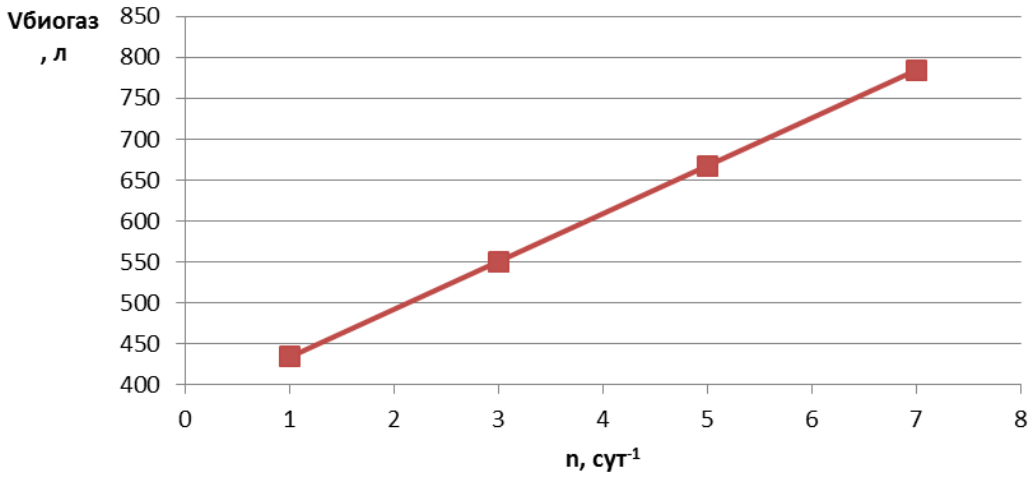

Рисунок 4 - Графическая зависимость влияния частоты перемешивания на интенсивность процесса газообразования (при длительности перемешивания 10мин)

Процесс газообразования по результатам данного многофакторного эксперимента (рисунок 4) прямо пропорционально зависит от частоты перемешивания перерабатываемого субстрата.

Исследования по выходу биогаза свыше 7 раз в сутки, проведенные предыдущими учеными, показывают, что дальнейшее увеличение числа перемешивания ведёт к незначительному увеличению выхода биогаза [7,8,9].

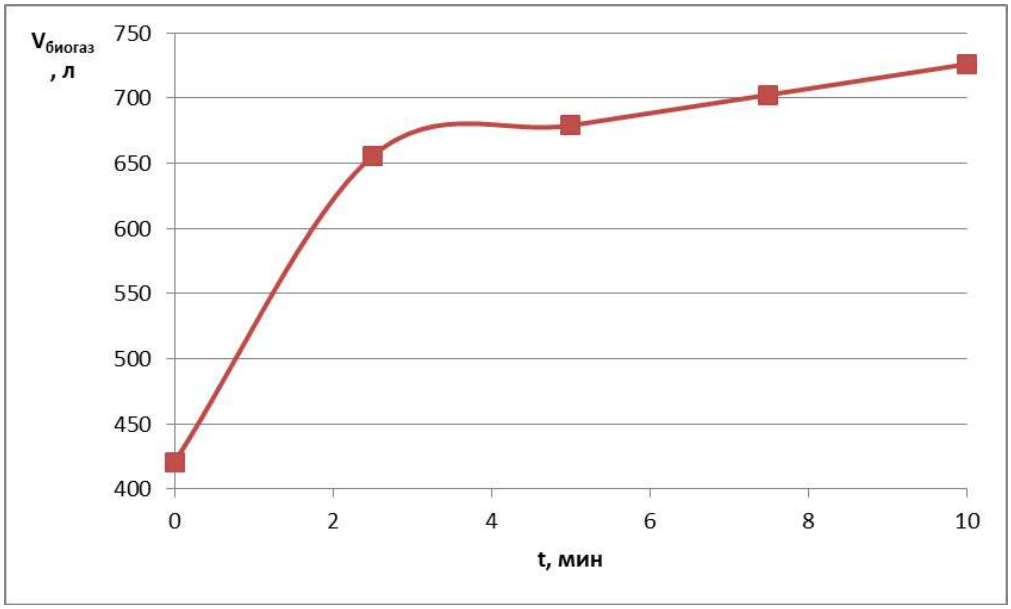

Рисунок 5 - Графическая зависимость влияния длительности перемешивания на интенсивность процесса газообразования (при периодичности 6 раз в сутки)

Анализируя зависимость на графике (рисунок 5) видно, что при увеличении времени перемешивания выход биогаза увеличивается, но более длительное перемешивание для опытного образца мобильной биогазовой установки экономически нецелесообразно.

Заключение. Таким образом, потребность в повышении эффективности утилизации органических отходов в биогазовой установке обусловлена значительными временными и экономическими затратами на соблюдение технологического процесса метанового сбраживания. Для увеличения выхода биогаза за счёт оптимизации системы гидравлического перемешивания необходимо правильно организовать технологический процесс, то есть найти оптимальное соотношение частоты и длительности перемешивания для конкретного субстрата и конструктивных особенностей установки. На примере опытного биореактора образца было получено уравнение регрессии и выявлено, что оптимальное время перемешивания составляет 10 мин по 6 раз в сутки. Полученные значения оптимальных параметров режима работы системы перемешивания совпадают с данными, которые публиковали авторы других похожих исследований – периодичность 5…8 раз в сутки с равномерно распределённым во времени интервалом в диапазоне 5…15мин.

Список источников

1. Органическое животноводство: опыт и перспективы развития / Л. Ю. Коноваленко, Н. П. Мишуров, П. И. Гриднев [и др.]. – Москва: ФГБНУ "Росинформагротех", 2021. – 88 с.
2. Баадер В. Биогаз: Теория и практика. (Пер с нем. и предисловие М.И. Серебряного.) / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. – М.: Колос, 1992. – 148 с., ил.
3. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ./ Под. ред. С. Соуфера, О. Заборски. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
4. Актуальность применения биогазовых установок в России и за рубежом / Б. Г. Зиганшин, И. И. Кашапов, И. Х. Гайфуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2017. – Т. 12, № 2(44). – С. 71-74.
5. Evaluation of effective manure disposal systems and its influence on soil fertility / P. I. Gridnev, T. T. Gridneva, Yu. Yu. Spotaru, W. Romaniuk // Agricultural Engineering. – 2016. – Vol. 20, No. 4. – P. 59-68.

6. Яковлева, Е. В. Биогазовая установка как способ решения проблемы утилизации отходов промышленного животноводства / Е. В. Яковлева, О. Я. Набокина, В. Н. Куракина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 5(67). – С. 231-233.

7. Дьячковская, Л. Н. Анализ конструкций биогазовых установок для переработки навоза / Л. Н. Дьячковская, С. С. Ямпилов, В. П. Друзьянова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2015. – № 3(40). – С. 78-84.

8. Васенев, В. В. Исследование параметров биогазовой установки для переработки отходов животноводства / В. В. Васенев, С. К. Шерьязов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3(71). – С. 169-172.

9. Захарченко, А. Н. Пути повышения производительности с.-х. биогазовых установок / А. Н. Захарченко, П. И. Гаджиев, А. А. Захарченко // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 5. – С. 10-11.

10. Колдин, М. С. Технологические основы переработки навозной массы с получением биогаза / М. С. Колдин, И. П. Криволапов // Наука и Образование. – 2021. – Т. 4, № 3.

11. Киров Ю. А. Разработка технологической линии для разделения навозных стоков // Техника и оборудование для села. 2012. № 4. С. 24-26.

12. Пат. 2787785 Российская Федерация, МПК7 A01C 3/00. Способ утилизации животноводческих стоков на органические удобрения и биогаз / Киров Ю. А., Милюткин В. А., Котов Д. Н., Киров В. Ю., Петушков А. В., Копытин В. Ю., Балабанов С. О., Шестаков В. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет» - № 2022110781; заяв. 21.04.2022; опубл. 12.01.2023, Бюл. №2. - 5 с.

13. Патент на полезную модель № 220010 U1 Российская Федерация, МПК C12M 1/02, C05F 9/02. Лабораторный биореактор: № 2023113278: заявл. 23.05.2023 : опубл. 21.08.2023 / Ю.А. Киров, В.Ю. Копытин, А.В. Петушков, С.В. Денисов, Д.Н. Котов, В.А. Киров, Ю.З. Кирова, К.А. Жичкин, К.В. Титоренко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аграрный университет".

14. Завалишин, Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства [Текст] / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – Москва: Колос, 1982. – 231 с.

15. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1976. – 280 с.

Reference

1. Organic animal husbandry: experience and prospects of development / L. Yu. Konovalenko, N. P. Mishurov, P. I. Gridnev [et al.]. – Moscow: Rosinformagrotech, 2021. – 88 p.

2. Baader V. Biogas: Theory and Practice. (Translated from German. and preface by M.I. Serebryany.) / V. Baader, E. Don, M. Brennderfer. – M.: Kolos, 1992. – 148 p., ill.

3. Biomass as an energy source: Translated from English/ Edited by S. Soufer, O. Zaborsky. – M.: Mir, 1985. – 368 p.

4. The relevance of the use of biogas plants in Russia and abroad / B. G. Ziganshin, I. I. Kashapov, I. H. Gayfullin [et al.] // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2017. – Vol. 12, No. 2(44). – pp. 71-74.

5. Evaluation of effective manure disposal systems and its influence on soil fertility / P. I. Gridnev, T. T. Gridneva, Yu. Yu. Spotaru, W. Romaniuk // Agricultural Engineering. – 2016. – Vol. 20, No. 4. – P. 59-68.

6. Yakovleva, E. V. Biogas plant as a way to solve the problem of industrial livestock waste disposal / E. V. Yakovleva, O. Ya. Nabokina, V. N. Kurakina // Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. – 2017. – № 5(67). – Pp. 231-233.

7. Dyachkovskaya, L. N. Analysis of designs of biogas plants for manure processing / L. N. Dyachkovskaya, S. S. Yampilov, V. P. Druzyanova // Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov. – 2015. – № 3(40). – Pp. 78-84.

8. Vasenev, V. V. Investigation of parameters of a biogas plant for processing animal waste / V. V. Vasenev, S. K. Sheryazov // Izvestiya Orenburg State Agrarian University. – 2018. – № 3(71). – Pp. 169-172.

9. Zakharchenko, A. N. Ways to increase the productivity of agricultural biogas plants / A. N. Zakharchenko, P. I. Gadzhiev, A. A. Zakharchenko // Tractors and agricultural machines. - 2013. – No. 5. – pp. 10-11.

10. Koldin, M. S. Technological bases of manure mass processing with biogas production / M. S. Koldin, I. P. Krivolapov // Science and Education. – 2021. – Vol. 4, No. 3.

11. Kirov Yu. A. Development of a technological line for the separation of manure effluents // Machinery and equipment for the village. 2012. No. 4. pp. 24-26.

12. Pat. 2787785 Russian Federation, IPC7 A01C 3/00. Method of utilization of animal waste for organic fertilizers and biogas / Kirov Yu. A., Milyutkin V. A., Kotov D. N., Kirov V. Yu., Petushkov A.V., Kopytin V. Yu., Balabanov S. O., Shestakov V. V. ; applicant and patent holder of Samara State Agrarian University - No. 2022110781; application. 21.04.2022; publ. 12.01.2023, Bul. No. 2. - 5 p.

13. Utility model patent No. 220010 U1 Russian Federation, IPC C12M 1/02, C05F 9/02. Laboratory bioreactor: No. 2023113278: application 23.05.2023: publ. 21.08.2023 / Yu.A. Kirov, V.Yu. Kopytin, A.V. Petushkov, S.V. Denisov, D.N. Kotov, V.A. Kirov, Yu.Z. Kirova, K.A. Zhichkin, K.V. Titorenko; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Agrarian University".

14. Zavalishin, F.S. Methods of research on the mechanization of agricultural production [Text] / F.S. Zavalishin, M.G. Matsnev. – Moscow: Kolos, 1982. – 231 p.

15. Adler, Yu. P. Experiment planning in the search for optimal conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky. – 2nd edition, revised and expanded. – Moscow: Federal State Unitary Enterprise "Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center "Nauka", 1976. – 280 p.

Информация об авторах

Ю.А. Киров – доктор технических наук, профессор, В.Ю. Копытин – аспирант, А.В. Петушков – аспирант.

Information about the authors

Yu. Kirov – Doctor of Technical Sciences, professor; V. Kopytin – postgraduate student; A. Petushkov - postgraduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 22.09.2023 Принята к публикации (Accepted): 24.10.2023