

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

И. Х. Гайфуллин, Б. Г. Зиганшин, Д. Т. Халиуллин

Реферат. Актуальность исследований переработки органических отходов сельского хозяйства с добавлением различных примесей с целью повышения выхода биогаза обусловлены растущей потребностью в эффективных и устойчивых источниках энергии. В условиях глобального изменения климата и истощения традиционных ресурсов, биогаз становится важной альтернативой, способствующей снижению выбросов парниковых газов и утилизации органических отходов. В настоящем исследовании рассматриваются процессы анаэробного сбраживания органических отходов, возникающих в сельском хозяйстве, с применением малообъемной биогазовой установки, разработанной в Казанском ГАУ. Целью работы является повышение эффективности выхода биогаза через оптимизацию параметров и режимов функционирования биогазовой установки. В ходе проведенных исследований использовались различные виды органических субстратов. Работа установки зависит от сети переменного тока (220 В) и потребляет электроэнергию не более 0,8 кВт·ч. При термофильном режиме (40-55°C) переработки различных субстратов было выработано следующее количество биогаза: 9 м³ из свиного навоза, 7,6 м³ из куриного помета, 4,96 м³ из лошадиного навоза и 8,3 м³ из навоза КРС. Наибольший прирост биогаза наблюдается при использовании лошадиного навоза в термофильном режиме. Результаты экспериментов показывают, что использование добавок, такие как препарат Мефосфон и различные растительные материалы, значительно увеличивает выход биогаза, что подтверждается полученными данными, где при использовании Мефосфона – 11,4 м³, измельченной кукурузы – 10,5 м³, опилки березы – 9,4 м³ и измельченной соломы – 9,1 м³. Эти результаты подчеркивают потенциал применения новых добавок в субстрат для оптимизации процессов биогазового производства и способствуют развитию более эффективных технологий в области возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: энергообеспеченность, органические отходы, биогаз, брожение, биоудобрения, экология.

Введение. Низкая энергообеспеченность представляет собой одну из ключевых проблем, стоящих перед современным сельским хозяйством. С учетом постоянного увеличения цен на традиционные источники энергии, развитие альтернативных источников энергии в сельском хозяйстве становится все более актуальным в современном мире [1,2,3]. В условиях нарастающих вызовов глобальной энергетической безопасности становится необходимым проведение антикризисной энергетической политики. Использование возобновляемых источников энергии способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду, помогает справляться с вызовами изменения климата и обеспечивает безопасное энергетическое будущее, что обусловлено их экологическими преимуществами и возможностью снижать углеродный след [4,5]. Одним из наиболее перспективных направлений в сфере возобновляемых источников энергии является переработка органических отходов в биогаз и высококачественные органические удобрения [6,7]. Массовое производство и внедрение технологии переработки органических отходов сельского хозяйства в биогаз создаст возможность применения его вместо традиционных источников энергии. При помощи биогазовых установок также возможно стабилизировать уровень накопления углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) в атмосфере и предотвратить его дальнейший рост [8,9]. В качестве субстрата для производства биогаза в основном служат органические отходы животноводства и птицеводства [10], включая жидкие и твердые отходы, а также отходы

ТБО [11], отходы лесопромышленного производства и сточных вод [12]. Для повышения выработки биогаза можно использовать солому злаковых культур, ботву свёклы, картофеля и другие. Выход биогаза зависит от качества подготовленного субстрата, определяемого его химическим и биологическим составом. При переработке растительных отходов иногда требуется оптимизировать соотношение углерода и азота (C:N) для ускорения метаногенеза. Это достигается добавлением в субстрат азотосодержащих отходов, таких как птичий помет или свиной навоз. Процесс ферментации субстрата в термофильных условиях длится не менее 10 дней. В среднем из 1 кг сухого вещества (СВ) навоза крупного рогатого скота (КРС) можно получить от 0,4 до 0,8 м³ биогаза. С целью освобождения газовых пузырьков и разрушения образующейся корки в реакторах применяют механические или гидравлические мешалки. Скорость перемешивания не должна превышать 50-70 мин⁻¹, чтобы избежать повреждения микробных клеток [13].

Биогаз можно сжигать непосредственно в газовых горелках без изменения конструкции форсунок или использовать его для генерации электроэнергии (3-5 кВт·ч) и тепла (5-7 кВт·ч) в когенерационных установках в зависимости от теплоты сгорания (21-35 мДж). После удаления из биогаза углекислого газа (CO₂) и сероводорода (H₂S) он преобразуется в биометан, который является полным аналогом природного газа. В результате ферментации органических отходов получается дегазированный высококачественный органический

биоудобрения [14].

Процесс ферментации с получением биогаза состоит из нескольких последовательных этапов: гидролиза, кислотогенной стадии, ацетогенной и метаногенной стадии, как показано на рисунке 1, который визуально напоминает химическую формулу

метана (CH_4). Наиболее важными стадиями являются кислотогенная стадия, в ходе которой образуются летучие жирные кислоты и метаногенная, в процессе которой полученные кислоты преобразуются в биометан (CH_4), представляющий собой конечный продукт данного процесса.

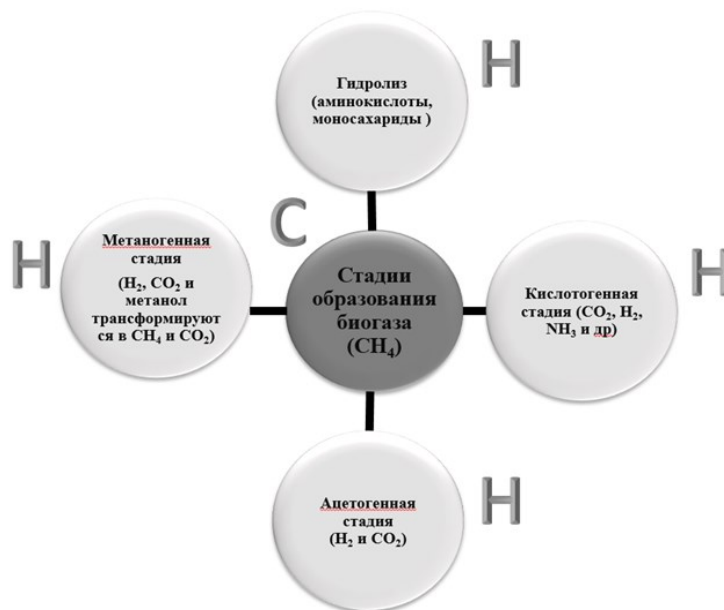


Рис. 1 – Стадии образования биогаза

В каждом этапе происходит сложный биохимический процесс, в котором участвуют группы микроорганизмов, таких как метаногены, ферментирующие бактерии, ацетогены и другие. Каждый из них выполняет свою роль на различных стадиях разложения субстрата. Для рационального функционирования этих микробных сообществ необходимо создать определенные условия, в том числе температура, влажность, кислотность, соотношение C:H [15].

Несмотря на имеющиеся технологии анаэробного сбраживания, её практическое применение ограничено из-за низкой эффективности существующих установок: длительное время обработки и малый выход биогаза. Цель данного исследования заключается в повышении выхода биогаза через оптимизацию параметров и режимов функционирования биогазовой установки.

Условия, материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований на кафедре машин и оборудования в агробизнесе Казанского ГАУ была разработана специализированная малообъемная биогазовая установка (МБУ), которая предназначена для малых хозяйств. Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. В процессе работы были переработаны в биогаз и высококачественные органические удобрения отходы из навоза КРС, свиней, лошадей и птичий помет при мезофильном и термофильном режимах сбраживания. Дополнительные исследования проводились с применением навоза КРС

различными добавками, такие как опилка березы, дробленая солома пшеницы, початков кукурузы в восковой спелости, которые вводились в пропорции 10% (различные добавки) к 90% (навоз КРС), и препарата Мефосфон. Исследования процессов анаэробного сбраживания органических отходов в биогазовой установке начинается с подготовки субстрата, загружаемого в реактор. Для точности экспериментов органические отходы, поступающие на переработку, взвешиваются на настольных электронных весах марки СмартВес ВП-100 (до 100 кг), а затем перемешиваются в емкости с теплой водой ($25-35^\circ\text{C}$). Для подготовки початков кукурузы к использованию их измельчают на установке КДУ-2, после чего измельченная масса смешивается с навозом в подготовительной емкости. Важно было добавить теплую воду, чтобы довести влажность смеси до 90%. Влажность определялась с помощью анализатора влажности ЭВЛАС-2М. Влияние препарата Мефосфон исследовалось при концентрации 10–4 г/л, а дозы вносимого препарата определялись согласно Технологическому регламенту № 05-9552 от 18.10.2017 и на основе предварительных лабораторных экспериментов, проведенных в Казанском ГАУ [16]. На рисунке 2а) представлен процесс измельчения початков кукурузы на КДУ-2, а также перемешивание дробленой массы с навозом КРС в подготовительной емкости с добавлением теплой воды доведением влажности до 90% (рис. 2б) [17,18].



а) процесс измельчения кукурузы



б) подготовка субстрата

Рис. 2 – Заготовка субстрата

Установка подключается к электрической сети с напряжением 220 V. В процессе работы необходимо поддерживать заданную температуру для работы биогазовой установки. Температура варьировалась в пределах 25-35°C для мезофильного температурного режима и 40-55°C для термофильного температурного режима. Для нагрева служит теплоэлектронагреватель, потребление которого 0,8 кВт·ч [18].

В первые же дни после запуска реактора начинается выработка биогаза. Объем выработанного биогаза фиксируется с помощью электронного газового счетчика. Удаление отработанного биоудобрения осуществляется самотеком или при помощи насоса посредством сливного патрубка, диаметр которого 50 мм.

Продолжительность технологического процесса термофильного режима сбраживания

субстрата в реакторе составлял 14 суток, а при мезофильном режиме 24 суток. Каждый эксперимент был проведен с 4-х кратным повторением на основе вышеперечисленных органических отходов при термофильном и мезофильном режимах сбраживания.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования, направленного на оптимизацию расчетных параметров и характеристик биогазовых установок, предназначенных для использования в крестьянских (фермерских) хозяйствах (КФХ) и личных подсобных хозяйствах (ЛПХ), были выполнены натурные испытания на сконструированной МБУ. Полученные данные (рис. 3) иллюстрируют зависимость объема производимого биогаза (в м³) от длительности цикла ферментации продолжительностью 24 суток при мезофильном режиме брожения субстратов.

Мезофильный температурный режим

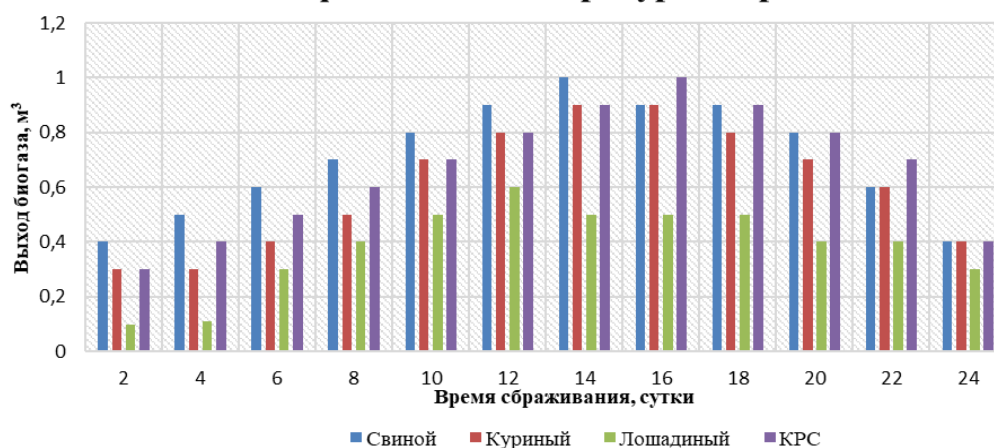


Рис. 3 – Выработка биогаза за 1 цикл мезофильного сбраживания субстрата

В качестве исходных материалов для эксперимента использовались свиной навоз, куриный помет, а также навоз лошадей и КРС из КФХ и ЛПХ. Результаты позволяют более точно оценить эффективность работы биогазовых установок и их адаптацию к условиям малых хозяйств [19,20]. Усредненные данные представлены в виде диаграмм, что позволяет наглядно оценить влияние различных видов

органических отходов и температурных режимов на процесс сбраживания.

Цикл мезофильного сбраживания с доведением температуры до 35°C длился 24 суток. Это позволило продемонстрировать практическую осуществимость процесса анаэробной переработки органических отходов сельскохозяйственного производства. В результате проведенных исследований был получен горючий

биогаз, что подтверждает перспективность технологии с мезофильным режимом сбраживания.

С целью повышения качества получаемого биогаза и сокращения продолжительности

цикла проводили аналогичные эксперименты при термофильном режиме сбраживания. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности данного режима, которые представлены на рисунке 4.

Термофильный температурный режим

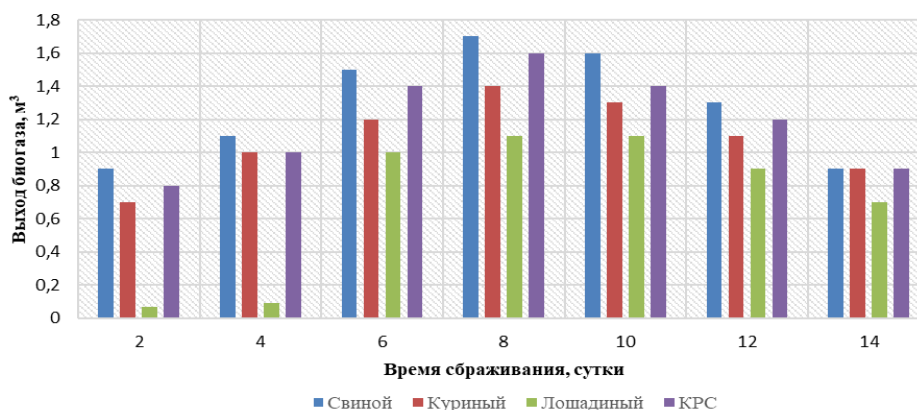


Рис. 4 – Выработка биогаза за 1 цикл термофильного сбраживания субстрата

Длительность цикла при термофильном сбраживании (55°C) сократился в два раза и составил 14 суток. Объем выработанного биогаза из различных видов субстрата при данном технологическом процессе следующий:

- свиной навоз: 9 м³ (увеличение на 5,5% по сравнению с мезофильным процессом);
- куриный помет: 7,6 м³ (увеличение на 4,1% по сравнению с мезофильным процессом);
- лошадиный навоз: 4,96 м³ (увеличение на 7,5% по сравнению с мезофильным процессом);
- навоз КРС: 8,3 м³ (увеличение на 3,75% по сравнению с мезофильным процессом).

При термофильном режиме сбраживания у субстрата с лошадиным навозом происходит

набольший прирост выхода биогаза по сравнению других субстратов в мезофильном режиме. Наибольший выход биогаза дал свиной навоз.

В ходе анализа экспериментальных зависимостей, полученных в результате исследований, установлено, что термофильный режим обеспечивает более высокий выход биогаза. Это связано с повышенной активностью микроорганизмов и бактерий, участвующих в процессе анаэробного сбраживания. Учитывая полученные результаты, были проведены дополнительные эксперименты, направленные на улучшение характеристик термофильного режима путем введения различных добавок. Результаты данных исследований представлены на примере навоза КРС на рисунке 5.

Выход биогаза с добавлением различных примесей

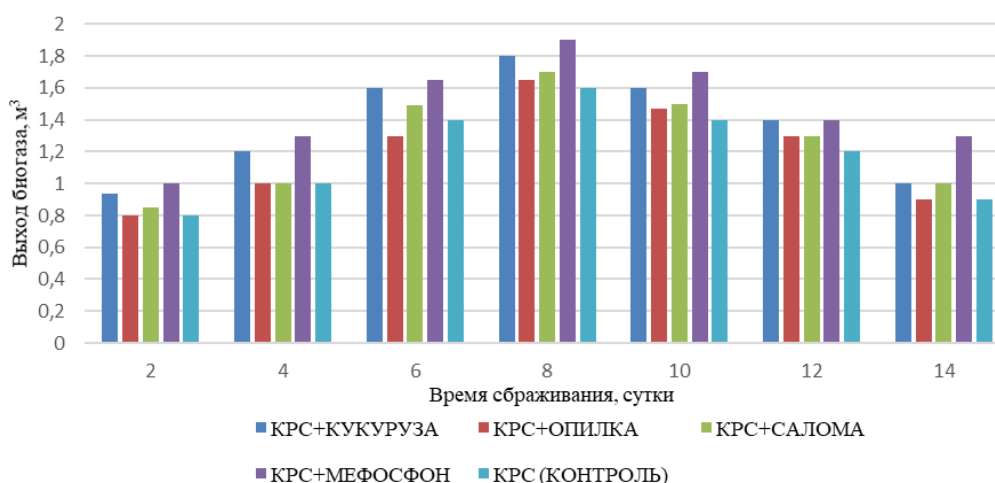


Рис. 5 – Выработка биогаза за 1 цикл термофильного сбраживания субстрата с различными добавками

Диаграмма демонстрирует выход биогаза в кубических метрах в разные дни с добавлением различных примесей в навоз крупного рогатого скота. Результаты показывают, что максимальный выход биогаза наблюдается при добавлении препарата Мефосфон – 11,4 м³ и измельченной кукурузы – 10,5 м³, в то время как контрольная группа демонстрирует минимальные значения. На 8 день все добавки показали общий рост. Сравнительный анализ указывает на то, что опилка березы – 9,4 м³ и дробленая солома – 9,1 м³ оказывают положительные влияния на выход биогаза, в то время они менее эффективны, но все же превосходят контрольную группу.

Выводы. Применение термофильного сбраживания позволило сократить длительность процесса в два раза, до 14 суток. Это привело к значительному увеличению выхода биогаза по сравнению с мезофильным режимом: на 5,5% для свиного навоза (9 м³), на 4,1% для куриного помета (7,6 м³), на 7,5% для лошадиного навоза (4,96 м³), и на 3,75% для навоза крупного рогатого скота (8,3 м³). Наибольший объем биогаза получен из свиного навоза (9 м³), при этом наибольший процентный прирост показал конский навоз (7,5%). Термофильный режим является более эффективным для фермерских хозяйств (КФХ) по нескольким причинам:

- во-первых, термофильные микроорганизмы, которые работают при температурах от 50 до 60°C, обладают более высокой скоростью разложения органических веществ, что приводит к более быстрому производству биогаза.
- во-вторых, термофильные условия способствуют более полному разрушению

патогенных микроорганизмов и семян сорняков, что делает конечный продукт более безопасным для использования в сельском хозяйстве.

В отличие от мезофильного режима, который работает при более низких температурах и имеет более длительные сроки разложения, термофильный процесс позволяет значительно сократить время обработки и повысить выход биогаза, что особенно важно для КФХ, стремящихся к максимальной эффективности и рентабельности.

Исследования с добавлением различных примесей подчеркивают новизну подхода к повышению выхода биогаза при термофильном режиме сбраживания. Наибольший выход биогаза достигается при использовании препарата Мефосфон (11,4 м³) и измельченной кукурузы (10,5 м³), опилки березы (9,4 м³) и измельченная солома (9,1 м³). Контрольная группа без добавок продемонстрировала минимальные значения (8,3 м³).

Полученные результаты подтверждают актуальность термофильного сбраживания как эффективного метода увеличения производства биогаза из различных видов органических отходов сельского хозяйства.

Сведения об источнике финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта (№142/2024 – ПД от 16.12.2024 г.) молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан.

Литература

1. Арсанукаев Д.Л., Зайналабдиева Х.М., Шидаева А.А. Микроэлементная индукция оксидоредуктивных аэробных трансформаций субстратов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2(66). С. 163-169. doi:10.18286/1816-4501-2024-2-163-169.
2. Energy Efficiency of the Extrusion Process and its Effect on Output of Biogas during the Fermentation of Maize and Rape Straw / M. Zabłodski, P. Klendiy, O. Dudar, D. Babak // Problems of the Regional Energetics. 2024. No. 1(61). P. 127-139. doi:10.52254/1857-0070.2024.1-61.11.
3. Bioenergy recovery from two-stage mesophilic-thermophilic anaerobic digestion of cheese whey / A. A. Kovalev, E. R. Mikheeva, I. V. Katraeva, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, No. 12. P. 4676-4685. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.003.
4. Оsepчук Д. В., Данилова А. А., Власов А. Б. Влияние скармливания кормовой добавки на основе отходов лесозаготовки на показатели мясной продуктивности перепелов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 1(69). С. 112-116. doi: 10.18286/1816-4501-2025-1-112-116.
5. Шогенов Ю. Х., Дударов З. И., Занилов А. Х. Оценка вклада корневого углеродного питания в формирование растительной биомассы в модельном эксперименте // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 4(76). С. 88-94. doi:10.12737/2073-0462-2024-88-94.
6. Livestock enterprises waste utilization for heat system supply to rural buildings in Yakutia / V. P. Druzyanova, G. E. Kokieva, I. A. Savvateeva, et al. // IOP conference series: materials science and engineering. Barnaul: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012018. doi:10.1088/1757-899X/941/1/012018.
7. Апажев А.К., Шехикачев Ю.А., Фиапшев А.Г. Разработка и исследование биореактора для получения биоудобрения и биогаза // Вестник Казанского ГАУ. 2016. Т. 11. № 2(40). С. 60-63. doi:10.12737/20637.
8. Лахонин П. Д., Колесник Н. С., Зеленченкова А. А. Влияние уровня концентратов на переваримость питательных веществ и количество метаногенов у овец // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 3(67). С. 174-181. doi: 10.18286/1816-4501-2024-3-174-181.
9. Использование органических отходов в качестве сырья для различных методов получения биотоплива (обзор) / А. Д. Горбенко, М. А. Каплан, А. В. Квитко, М. А. Севостьянов // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 4. С. 61-68. doi: 10.53859/02352451_2023_37_4_61.
10. Друзьянова В.П., Сергеев Ю.А. Технология анаэробного сбраживания бесподстилочного навоза крупного рогатого скота // Аграрная наука. 2015. № 5. С. 24-26.
11. Fiapshv A. G., Khamokov M.M., Kilchukova O.Kh. Mathematical model of heat transfer in the reactor of

a biogas plant // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation. Vol. 1679. Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52074. doi:10.1088/1742-6596/1679/5/052074.

12. Гайдар С. М., Пикина А. М., Лапсарь О. М. Технология переработки жиросодержащих отходов мясо-перерабатывающих предприятий в поверхностно-активные вещества // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 12. С. 77-81. doi: 10.53859/02352451_2023_37_12_77.

13. Технологическое и техническое обеспечение повышения эффективности интенсивного горного и предгорного садоводства / А. Л. Хажметова, А. К. Апажеев, Ю. А. Шекихачев, и др. // Техника и оборудование для села. 2019. № 6(264). С. 23-28. doi:10.33267/2072-9642-2019-6-23-28.

14. Hung C. H., Chang Y. T., Chang Y. J. Roles of microorganisms other than Clostridium and Enterobacter in anaerobic fermentative biohydrogen production systems—a review // Bioresource technology. 2011. Т. 102. №. 18. С. 8437-8444.

15. Ratti R.P. Thermophilic hydrogen production from sugarcane bagasse pretreated by steam explosion and alkaline delignification // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Т. 40. №. 19. С. 6296-6306.

16. The use of the Mephosphon drug to accelerate the process of biogas output and ripening of organic wastes / Z. Khaliullina, Yu. Shogenov, I. Gayfullin et al. // Bio web of conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2020). EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. P. 00127. doi:10.1051/bioconf/20202700127.

17. Dai N. H. Hydrogen production from acidic, alkaline, and steam-exploded Bambusa stenostachya hydrolysates in dark fermentation process // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. С. 1-12.

18. Актуальность применения биогазовых установок в России и за рубежом / Б. Г. Зиганшин, И. И. Кашапов, И. Х. Гайфуллин, и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2017. Т. 12. № 2(44). С. 71-74. doi:10.12737/article_59ad07085075f5.79036838.

19. Расчет теплового баланса и обоснование параметров малогабаритной биогазовой установки с мезофильным сбраживанием субстрата / Б. Г. Зиганшин, И. Х. Гайфуллин, А. И. Рудаков и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2016. Т. 11. № 3(41). С. 63-67. doi:10.12737/22678.

20. Использование удобрений из куриного помета для выращивания органической продукции / А. С. Ганиев, Ф. С. Сибгатуллин, Б. Г. Зиганшин, и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 9-14. doi:10.12737/2073-0462-2022-9-14.

Сведения об авторах:

Гайфуллин Ильнур Хамзович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: ilnur-gai@yandex.ru

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе, профессор РАН, e-mail: zigan66@mail.ru

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: damirtag@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

IMPROVEMENT OF BIOGAS PLANT OPERATION MODES

I. Kh. Gayfullin, B. G. Ziganshin, D. T. Khaliullin

Abstract. The relevance of research on the processing of organic agricultural waste with the addition of various impurities in order to increase the yield of biogas is due to the growing need for efficient and sustainable energy sources. In the context of global climate change and the depletion of traditional resources, biogas is becoming an important alternative that helps reduce greenhouse gas emissions and recycle organic waste. This study examines the processes of anaerobic digestion of organic waste generated in agriculture using a small-volume biogas plant developed at Kazan State Agrarian University. The aim of the work is to increase the efficiency of biogas output through optimization of the parameters and operating modes of the biogas plant. Various types of organic substrates were used in the studies. The operation of the plant depends on an alternating current network (220 V) and consumes no more than 0.8 kW·h of electricity. In the thermophilic mode (40-55°C) of processing various substrates, the following amount of biogas was produced: 9 m³ from pig manure, 7.6 m³ from chicken manure, 4.96 m³ from horse manure and 8.3 m³ from cattle manure. The greatest increase in biogas is observed when using horse manure in the thermophilic mode. The experimental results show that the use of additives such as Mephosphon and various plant materials significantly increases the output of biogas, which is confirmed by the data obtained, where when using Mephosphon - 11.4 m³, crushed corn - 10.5 m³, birch sawdust - 9.4 m³ and crushed straw - 9.1 m³. These results emphasize the potential of using new additives in the substrate to optimize biogas production processes and contribute to the development of more efficient renewable energy technologies.

Key words: energy supply, organic waste, biogas, fermentation, biofertilizers, ecology.

References

1. Arsanukaev DL, Zaynalabdieva KhM, Shidaeva AA. [Microelement induction of oxidoreductive aerobic transformations of substrates]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 2 (66). 163-169 p. doi:10.18286/1816-4501-2024-2-163-169.

2. Zablodskiy M, Klendiy P, Dudar O, Babak D. Energy efficiency of the extrusion process and its effect on output of biogas during the fermentation of maize and rape straw. Problems of the Regional Energetics. 2024; 1(61). 127-139 p. doi:10.52254/1857-0070.2024.1-61.11.

3. Kovalev AA, Mikheeva ER, Katraeva IV. Bioenergy recovery from two-stage mesophilic-thermophilic anaerobic digestion of cheese whey. International Journal of Hydrogen Energy. 2023; Vol.48. 12. 4676-4685 p. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.003.

4. Osepchuk DV, Danilova AA, Vlasov AB. [Effect of feeding a feed additive based on logging waste on meat productivity indicators of quails]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2025; 1(69). 112-116 p. doi: 10.18286/1816-4501-2025-1-112-116.

5. Shogenov YuKh, Dudarov ZI, Zanirov AKh. [Assessment of the contribution of root carbon nutrition to the formation of plant biomass in a model experiment]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2024; Vol.19. 4(76). 88-94 p. doi:10.12737/2073-0462-2024-88-94.

6. Druzyanova VP, Kokieva GE, Savvateeva IA. Livestock enterprises waste utilization for heat system supply to rural buildings in Yakutia. IOP conference series: materials science and engineering. Barnaul: Institute of Physics Publishing, 2020; 012018 p. doi:10.1088/1757-899X/941/1/012018.
7. Apazhev AK, Shekhikachev YuA, Fiapshev AG. [Development and study of a bioreactor for producing biofertilizer and biogas]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2016; Vol.11. 2(40). 60-63 p. doi:10.12737/20637.
8. Lakhonin PD, Kolesnik NS, Zelenchenkova AA. [Effect of concentrate levels on nutrient digestibility and amount of methanogens in sheep]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 3(67). 174-181 p. doi: 10.18286/1816-4501-2024-3-174-181.
9. Gorbenko AD, Kaplan MA, Kvitko AV, Sevostyanov MA. [Use of organic waste as raw materials for various methods of producing biofuels (review)]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023; Vol.37. 4. 61-68 p. doi: 10.53859/02352451_2023_37_4_61.
10. Druzyanova VP, Sergeev YuA. [Technology of anaerobic digestion of beddingless cattle manure]. Agrarnaya nauka. 2015; 5. 24-26 p.
11. Fiapshev AG, Khamokov MM, Kilchukova OKh. Mathematical model of heat transfer in the reactor of a biogas plant. Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation. Vol.1679. Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2020; 52074 p. doi:10.1088/1742-6596/1679/5/052074.
12. Gaydar SM, Pikina AM, Lapsar OM. [Technology of processing fat-containing waste from meat processing plants into surfactants]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023; Vol.37. 12. 77-81 p. – doi: 10.53859/02352451_2023_37_12_77.
13. Khazhmetova AL, Apazhev AK, Shekhikachev YuA. [Technological and technical support for increasing the efficiency of intensive mountain and foothill horticulture]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2019; 6(264). 23-28 p. doi:10.33267/2072-9642-2019-6-23-28.
14. Hung CH, Chang YT, Chang YJ. Roles of microorganisms other than Clostridium and Enterobacter in anaerobic fermentative biohydrogen production systems - a review. Bioresource technology. 2011; Vol.102. 18. 8437-8444 p.
15. Ratti RP. Thermophilic hydrogen production from sugarcane bagasse pretreated by steam explosion and alkaline delignification. International Journal of Hydrogen Energy. 2015; Vol.40. 19. 6296-6306 p.
16. Khaliullina Z, Shogenov Yu, Gayfullin I. The use of the Mephospon drug to accelerate the process of biogas output and ripening of organic wastes. Bio web of conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2020). EDP Sciences: EDP Sciences. 2020; 00127 p. doi:10.1051/bioconf/20202700127.
17. Dai NH. Hydrogen production from acidic, alkaline, and steam-exploded Bambusa stenostachya hydrolysates in dark fermentation process. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021; 1-12 p.
18. Ziganshin BG, Kashapov II, Gayfullin IKh. [Relevance of the use of biogas plants in Russia and abroad]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2017; Vol.12. 2(44). 71-74 p. doi:10.12737/article_59ad07085075f5.79036838.
19. Ziganshin BG, Gayfullin IKh, Rudakov AI. [Calculation of heat balance and justification of parameters of a small-sized biogas plant with mesophilic fermentation of substrate]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2016; Vol.11. 3(41). 63-67 p. doi:10.12737/22678.
20. Ganiev AS, Sibagatullin FS, Ziganshin BG. [Use of fertilizers from chicken manure for growing organic products]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2022; Vol.17. 1(65). 9-14 p. doi:10.12737/2073-0462-2022-9-14.

Authors:

Gayfullin Ilnur Khamzovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, e-mail: ilnur-gai@yanex.ru
 Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, Professor of the Russian Academy of Sciences, e-mail: zigan66@mail.ru
 Khaliullin Damir Tagirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Head of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, e-mail: damirtag@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.