

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62

Сулов Д.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: suslov1687@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ БИОМАССЫ НА ПРОИЗВОДСТВО БИОМЕТАНА

Аннотация. Работа посвящена исследованию процесса получения альтернативного источника энергии – биометана в анаэробном метантенке, оснащенном системой барботажного перемешивания, при утилизации отходов свиноводческих предприятий. Наиболее эффективными методами повышения эффективности работы биометановых установок являются увеличение интенсивности перемешивания и температуры биомассы. Однако, в настоящее время имеются различные данные об оптимальной температуре процесса ферментации и частоте перемешивания биомассы, поэтому актуальным является проведение исследований в данной области и определение оптимальных значений исследуемых параметров. Для проведения исследований принят центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента с общим количеством опытов – 13 шт. Проведены экспериментальные исследования процесса получения биометана при анаэробной ферментации свиного навоза в мезофильном температурном режиме. В результате реализации плана исследований построена поверхность функции отклика и получено уравнение регрессии, характеризующее влияние частоты барботажного перемешивания и температуры биомассы на выход биометана. На основе уравнения регрессии построены графические зависимости удельного выхода биометана от варьируемых факторов. Установлен оптимальный режим работы биометановой установки, который достигается при интенсивности перемешивания $3...5 \text{ сут}^{-1}$ и температуре биомассы $39,5...40,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальный удельный выход биометана составил $417,53 \text{ л/кг}$.

Ключевые слова: биометан, анаэробная ферментация, температура биомассы, барботажное перемешивание.

Введение. Газификация населенных пунктов Российской Федерации является приоритетной задачей страны, так как позволяет развивать экономику и инфраструктуру регионов страны, повысить эффективность работы предприятий и улучшить условия жизни населения.

Одним из перспективных направлений развития систем газоснабжения, получившим широкое применение в развитых странах мира, является использование биометана [1–4]. Биометан получают в процессе анаэробной ферментации органических веществ в метантенках различной конструкции. В качестве исходного субстрата для производства биометана используют сельскохозяйственные и бытовые коммунальные отходы, городские сточные воды, отходы пищевой и перерабатывающей промышленности [5–7]. Эффективность анаэробной ферментации и количество производимого биометана зависят от следующих параметров: химический состав и кислотность биомассы, температура, время пребывания биомассы в метантенке, перемешивание и степень разложения биомассы [8, 9].

Одними из основных параметров, влияющих на эффективность работы метантенка, являются интенсивность перемешивания и температура биомассы. Поддержание и равномерное распределение температуры является важным фактором

стабильной работы станций производства биометана [10].

При производстве биометана выделяют 3 температурных режима: психрофильный (до $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), мезофильный ($30\text{--}45 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и термофильный ($50\text{--}60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [10, 11].

Современные биометановые установки работают в мезофильном и термофильном режимах [11]. Большинство действующих биометановых установок функционируют в мезофильном режиме [10–12]. Это позволяет получать большое количество биометана при небольших затратах энергии на обогрев метантенка. При этом имеются различные данные об оптимальной температуре процесса анаэробного брожения в мезофильном режиме. В работах [12–14] указывается, что наибольшее количество биометана выделяется при температурах $32\text{--}35 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, также много работ, в которых указывается, что оптимальной температурой является $37\text{--}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [8, 15–17]. Следовательно, актуальным является проведение исследований и уточнение оптимальных значений температуры биомассы для эффективной работы биогазовых станций.

Для равномерного распределения температуры биомассы и концентрации бактерий по всему объему метантенка используют системы

перемешивания 3 видов: механические, гидравлические и барботажные (пневматические) [18]. Наибольшее применение получили механические системы с лопастными и пропеллерными мешалками. Гидравлическое перемешивание осуществляется рециркуляцией биомассы из одной части метантенка в другую с помощью насоса. Барботажное перемешивание производится подачей биогаза в нижнюю часть биометана. Пузыри газа, поднимаясь вверх, вызывают циркуляцию биомассы и ее интенсивное перемешивание.

Перемешивание биомассы в метантенке осуществляется двумя режимами: непрерывно или периодически. Непрерывный режим перемешивания позволяет добиться стабильности выхода

биометана, однако требует больших затрат энергии на работу системы перемешивания, что снижает КПД биометановых станций [18]. Поэтому, в настоящее время, большое внимание уделяется исследованию периодического режима перемешивания и определению оптимальной частоты перемешивания для максимального производства биометана [18–21].

Целью работы является исследование влияния интенсивности барботажного перемешивания и температуры биомассы в метантенке на эффективность процесса анаэробной ферментации.

Материалы и методы. Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Основным оборудованием установки являются метантенк, фильтр, счетчик биометана и газгольдер.

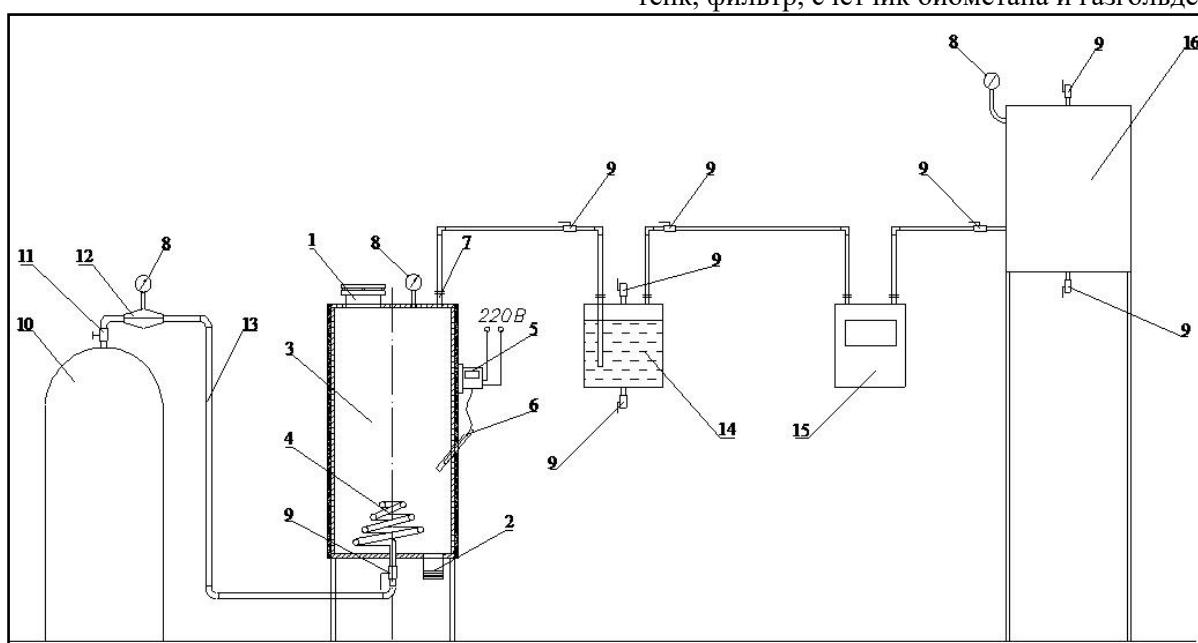


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – патрубок входа исходного субстрата; 2 – патрубок удаления переработанного субстрата;
3 – корпус метантенка; 4 – барботажный трубопровод; 5 – регулятор температуры; 6 – термометр;
7 – патрубок выхода биометана; 8 – манометр; 9 – кран шаровый; 10 – баллон с биометаном; 11 – вентиль;
12 – редуктор снижения давления; 13 – трубопровод подвода биометана на перемешивание; 14 – водяной фильтр; 15 – счетчик биометана; 16 – газгольдер.

Метантенк представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость со следующими размерами: высота 1 м, диаметр – 0,5 м, объем 0,196 м³. Известно, что вертикальные метантенки занимают меньшую площадь и имеют меньшие затраты на теплоизоляционное покрытие, по сравнению с горизонтальными установками. Для поддержания температуры метантенк содержит систему обогрева, включающую нагревательный электрический кабель мощностью 250 Вт, расположенный на наружной стенке метантенка, регулятор температуры с термометром. Для снижения потерь тепла метантенк покрыт теплоизоляционным материалом толщиной 10 мм. Поддер-

жание температуры биомассы в метантенке на заданном уровне производилось с помощью электронного программируемого регулятора температуры «RTC 80».

Для равномерного распределения температуры и концентрации субстрата применяется система барботажного перемешивания. Система перемешивания содержит барботажный трубопровод диаметром 15 мм, выполненный в форме спирали с отверстиями для выхода газа в количестве 17 шт, баллон с биометаном объемом 50 л. и соединительный трубопровод диаметром 15 мм. Давление биометана, подаваемого на перемешивание регулируется редуктором давления и контролируется по манометру.

В качестве исходного субстрата используется свиной навоз объемной влажностью 90 %. Температурный режим мезофильный с диапазоном температуры 30-41 °С. Продолжительность одного цикла процесса получения биометана составляет 30 суток. Режим работы системы перемешивания периодический.

При проведении экспериментальных исследований непосредственному измерению подлежали следующие параметры: объем биометана; температура биомассы в метантенке; избыточное давление биометана в метантенке и газгольдере; температура окружающей среды; время проведения опыта; масса исходного субстрата. Объем производимого биометана измеряли счетчиком газовым диафрагменным типа ВК-Г 4Т. Температура биомассы в метантенке определялась термометром техническим марки ТТЖ-М исполнение 1. Избыточное давление биометана в метантенке и газгольдере измеряли манометрами марки МПЗ-У.

Для проведения экспериментальных исследований разработана программа исследований с применением методов центрального композиционного планирования эксперимента. Применение центрального композиционного планирования позволяет установить влияние факторов на функцию отклика, сократить количество проводимых экспериментов и получить математическое описание исследуемого процесса.

Основным параметром исследований является удельный выход биометана, определяемый в литрах на 1 килограмм абсолютно сухого вещества исходного субстрата.

Удельный выход биометана $Q_{уд}$ (л/кг) определяется косвенным методом по следующей формуле:

$$Q_{уд} = V_B / m \quad (1)$$

где V_B – объем получаемого биометана, л; m – масса абсолютно сухого вещества биомассы, кг.

За параметр оптимизации принят удельный выход биометана, в качестве варьируемых факторов приняты температура биомассы в метантенке (t , °С) и частота перемешивания ($N_{пер}$, сут⁻¹), тогда функция отклика имеет следующий вид:

$$Q_{уд} = f(t, N_{пер}). \quad (2)$$

В качестве плана исследований принят центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента, позволяющий получить более точное математическое описание функции отклика за счет увеличения количества опытов в центре плана [22]. Для двух исследуемых факторов общее количество опытов составит 13 с величиной звездного плеча $\alpha=1,414$.

С учетом операции кодирования исследуемых факторов функция отклика примет вид:

$$Q_{уд} = f(X_1, X_2), \quad (3)$$

где X_1 – температура биомассы в метантенке, °С; X_2 – частота перемешивания, сут⁻¹.

Значения исследуемых факторов в центре плана выбраны на основе литературного обзора и ранее проведенных автором исследований [23], и составляют: $X_1 = 37^\circ\text{C}$, $X_2 = 3 \text{ сут}^{-1}$. Значения факторов в соответствии с центральным композиционным ротатбельным планом полного факторного эксперимента вида 2^2 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Факторы	Интервал варьирования факторов	Уровни варьирования факторов				
		-1,41	-1	0	+1	+1,41
X_1 – температура биомассы в метантенке, °С	2,5	33,5	34,5	37	39,5	40,5
X_2 – частота перемешивания, сут ⁻¹	2	0	1	3	5	6

Математическая обработка результатов проведенных исследований выполнена в программном комплексе STATISTICA 10. В результате обработки получено уравнение регрессии, произведена адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера, значимость коэффициентов определена по критерию Стьюдента.

$$Q_{уд} = 152,45 - 21,53t + 0,596t^2 + 62,47 N_{пер} - 1,98 N_{пер}^2 - 0,75t N_{пер}. \quad (4)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что исследуемые факторы оказывает примерно равное влияние на выход биометана.

Основная часть. Результаты многофакторного эксперимента функции $Q_{уд} = f(t, N_{пер})$ представлены в виде уравнения регрессии в натуральных величинах (4) и поверхности функции отклика (рисунок 2):

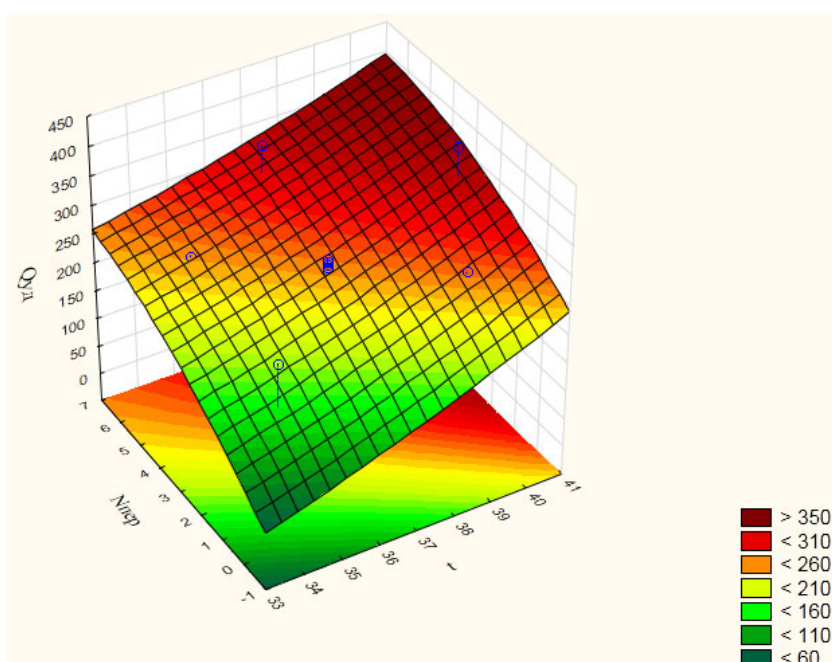


Рис. 2. График поверхности отклика зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы и частоты перемешивания

Анализируя график (рис. 2) видно, что минимальные значения удельного выхода биометана наблюдаются при температуре биомассы 33 °С и режиме без перемешивания. При увеличении температуры биомассы и частоты перемешивания удельный выход биометана повышается.

Для более полного определения влияния исследуемых параметров на процесс производства

биометана на основании уравнения регрессии (4) построены графические зависимости (рис. 3, 4).

На рисунке 3 представлен график зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы в метантенке при различных значениях частоты перемешивания.

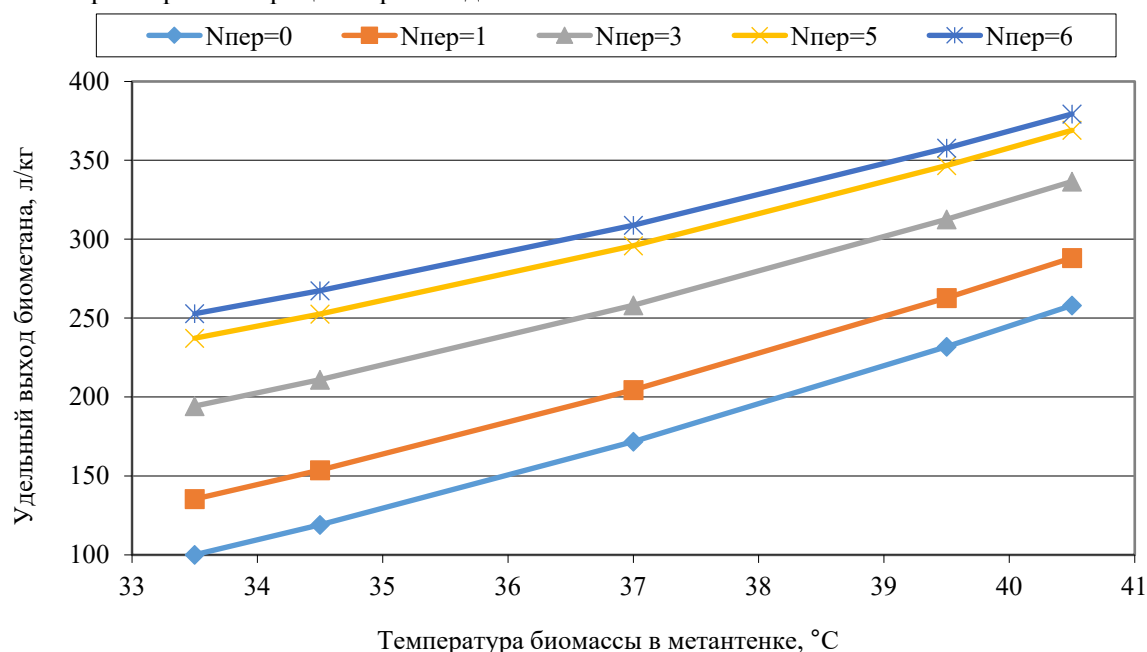


Рис. 3. График зависимости удельного выхода биометана от температуры биомассы

Из графика (рис. 3) видно, что при всех режимах перемешивания при повышении температуры биомассы наблюдается увеличение выхода биометана. Рассмотрим зависимость удельного выхода биометана от температуры биомассы в метантенке при частоте перемешивания $N_{\text{пер}}=6$ сут⁻¹. Так, при температуре биомассы

33,5 °С удельный выход биометана составил 252,85 л/кг. При увеличении температуры биомассы с 33,5 до 34,5 °С выход биометана повышается на 14,50 л/кг или 5,74 %. При дальнейшем увеличении температуры биомассы с 34,5 до 37 °С выход биометана повышается еще на 41,46 л/кг, что составляет 22,13 % от первоначальных

значений. При увеличении температуры биомассы с 37 до 39,5 °С выход биометана повышается на 48,91 л/кг или на 41,48 % по сравнению с первоначальной температурой. При увеличении температуры биомассы с 39,5 до 40,5 °С выход биометана повышается еще на 21,65 л/кг. Изменение температуры биомассы с 33,5 до 40,5 °С влечет повышение удельного выхода биометана на 126,518 л/кг или на 50,04 %.

Проведенный анализ показал, что во всем диапазоне температур от 33,5 до 40,5 °С наблюдается значительный рост выхода биометана,

обусловленный увеличением скорости роста бактерий. При этом дальнейшее увеличение температуры свыше 41 °С является экономически нецелесообразным, так как удельные затраты на повышение температуры меньше прироста выхода биометана.

На рисунке 4 представлено влияние частоты перемешивания биомассы в метантенке на удельный выход биометана при различных температурах процесса.

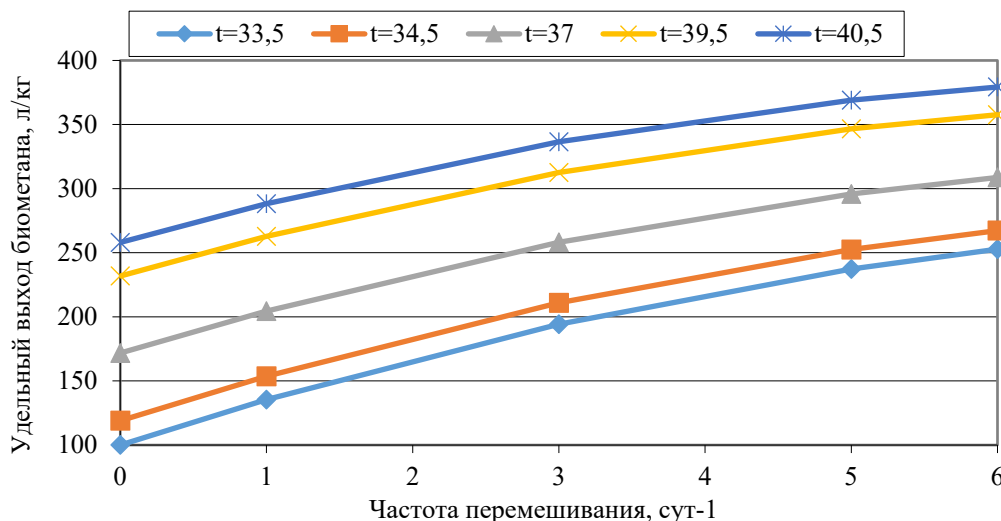


Рис. 4. График зависимости объемного выхода биометана от частоты перемешивания

Рассмотрим зависимость удельного выхода биометана от частоты перемешивания при температуре 40,5 °С (рис. 4). В режиме без перемешивания ($N_{\text{пер}}=0$) удельный выход биометана составил 258,07 л/кг. При увеличении частоты перемешивания с 0 до 1 сут⁻¹ удельный выход биометана повышается на 30,12 л/кг или 11,67 %. При увеличении частоты перемешивания с 1 до 3 сут⁻¹ выход биометана повышается на 48,35 л/кг, что составляет 30,41 % от первоначальных значений. При увеличении частоты перемешивания с 3 до 5 сут⁻¹ выход биометана повышается еще на 32,51 л/кг или на 43 % по сравнению с режимом без перемешивания. При дальнейшем увеличении частоты перемешивания до 6 сут⁻¹ выход биометана повышается незначительно – на 10,30 л/кг. Таким образом, изменение частоты перемешивания с 0 до 6 сут⁻¹ влечет повышение объемного выхода биометана на 121,29 л/кг или на 47 %.

Проведенный анализ показал, что зависимости удельного выхода биометана от частоты перемешивания при всех значениях температуры имеют степенной характер. Так, повышение частоты перемешивания до 5 раз в сутки ведет к значительному повышению выхода биометана. Однако, при более интенсивном перемешивании ($N_{\text{пер}} > 5$ раз в сутки) удельный выход биометана увеличивается незначительно.

Решение уравнения регрессии хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований, и показывает, что наиболее оптимальными значениями параметров температуры биомассы и частоты перемешивания являются $t = 39,5 \dots 40,5$ °С, $N_{\text{пер}} = 3 \dots 5$ сут⁻¹, следовательно, данный режим работы может быть рекомендован при использовании метантенка с барботажным перемешиванием для получения биометана из отходов сельскохозяйственных предприятий.

Выводы. Для исследования влияния технологических факторов на эффективность процесса анаэробной ферментации разработана программа исследований на экспериментальной установке с метантенком объемом 0,196 м³. В качестве плана исследований принят центральный композиционный ротatableльный план полного факторного эксперимента, позволяющий оценить влияние температуры и частоты перемешивания субстрата в метантенке на выход биометана.

В результате экспериментальных исследований определена поверхность функции отклика и получено математическое выражение в виде уравнения регрессии, характеризующее влияние температуры биомассы и частоты барботажного перемешивания на удельный выход биометана при анаэробной ферментации в мезофильном температурном режиме.

Построены графические зависимости удельного выхода биометана от варьируемых факторов, произведена оценка влияния каждого фактора на параметр оптимизации. Установлены оптимальные диапазоны значений варьируемых факторов: частота перемешивания 3...5 сут⁻¹, температура биомассы 39,5...40,5 °С, которые соответствует значению удельного выхода биометана $Q_{y0} = 417,53$ л/кг.

Полученные результаты исследований рекомендуются использовать при утилизации отходов свиноводческих отходов в биометановых установках, оснащенных барботажными системами перемешивания и работающими в мезофильном температурном режиме.

Примечание. Результаты, приведенные в статье, были представлены при защите диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Сулов Д.Ю. «Разработка научно-технических основ совершенствования систем снабжения биогазом», ранее в открытой печати не публиковались.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Padi R.K., Douglas S., Murphy F. Techno-economic potentials of integrating decentralised biomethane production systems into existing natural gas grids // *Energy*. 2023. Vol. 283. 128542. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128542.
2. Negro V., Noussan M., Chiaramonti D. Alternative options for biogas-to-energy: A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site // *Applied Energy*, 2025. Vol. 377. Part D. 124687. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124687.
3. Ning X., Deng Ch., Hickey D.T., Hackula A., O'Shea R., Wall D.M., Lin R., Murphy J.D. Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 423. 138723. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138723.
4. Barbera E., Menegon S., Banzato D., D'Alpaos C., Bertucco A. From biogas to biomethane: A process simulation-based techno-economic comparison of different upgrading technologies in the Italian context // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 135. Pp. 663–673. DOI: 10.1016/j.renene.2018.12.052.
5. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh Kh., Alkhasawneh H. E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035.
6. Awasthi M.K., Sarsaiya S., Wainaina S., Rajendran K., Awasthi S. K., Liu T., Duan Y. Jain A., Sindhu R., Binod P., Pandey A., Zhang Z., Taherzadeh M.J. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 110837. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110837.
7. Wang J., Chai Y., Shao Y., Qian X. Techno-economic Assessment of Biogas Project: a Longitudinal Case Study from Japan // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. 105174. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105174.
8. Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H.S., Mohammed A.J., Ghazy H., Shakir M.N., Lawas A.M., Mohammed S.K., Idan A.H., Mahmoud Z.H., Sayadi H., Kianfar E. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review // *Results in Chemistry*. 2024. Vol. 7. 101549. DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101549.
9. Sher F., Smjecnin N., Hrnjic H., Karadza A., Omanovic R., Sehovic E., Sulejmanovic J. Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. Pp. 834–859. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.138.
10. Garkoti P., Ni J.-Q., Thengane S.K. Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. 114430. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114430.
11. Devi M.K., Manikandan S., Oviyapriya M., Selvaraj M., Assiri M.A., Vickram S., Subbaiya R., Karmegam N., Ravindran B., Chang S.W., Awasthi M.K. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 363. 127871. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127871.
12. Basinas P., Rusin J., Chamrádová K. Assessment of high-solid mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of mechanically-separated municipal solid waste // *Environmental Research*. 2021. Vol. 192. 110202. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110202.
13. Niu Q., Takemura Y., Kubota K., Li Yu.-Y. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: Microbial community dynamics and process resilience // *Waste Management*. 2015. Vol. 43. Pp. 114–122. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.012.
14. Bahadur A., Zhang L., Guo W., Sajjad W., Ilahi N., Banerjee A., Faisal S., Usman M., Chen T., Zhang W. Temperature-dependent transformation of microbial community: A systematic approach to analyzing functional microbes and biogas production // *Environmental Research*. 2024. Vol. 249. 118351. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118351.

15. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? // *Water Research*. 2014. Vol. 53. Pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.035.

16. Białobrzewski I., Waszkielis K., Bułkowska K. The application of Anaerobic Digestion Model No. 1 for the optimization of biogas production from maize silage, pig manure, cattle manure, and digestate in a full-scale biogas plant // *Fuel*. 2024. Vol. 357, Part B. 129789. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129789.

17. Zhang L., Loh K.-C., Zhang J. Jointly reducing antibiotic resistance genes and improving methane yield in anaerobic digestion of chicken manure by feedstock microwave pretreatment and activated carbon supplementation // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 372. Pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.207.

18. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R.B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. Pp. 1030–1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182.

19. Ratanatamskul C., Saleart T. Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester

for conversion of food wastes to biogas and energy recovery // *Environ Sci Pollut Res*. 2016. № 23. Pp. 7092–7098. DOI: 10.1007/s11356-015-4448-0.

20. Babaei A., Shayegan J. Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester // *J Environ Health Sci Engineer*. 2019. № 17. Pp. 1077–1084. DOI:10.1007/s40201-019-00422-6.

21. Nauman M., Tayyab M., Faheem M., Ikram K., Akram M.W., Asif M., Omar M.M. Designing and performance evaluation of continuously stirring anaerobic batch reactor for biomethane production from biowaste // *Biomass Conv. Bioref*. 2024. № 14, Pp. 18065–18078. DOI: 10.1007/s13399-023-04203-y.

22. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975. 48 с.

23. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of the process of obtaining biogas from wastes from agricultural enterprises // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, 2019. 8725328. DOI: 10.1109/Eastonf.2019.8725328.

Информация об авторах

Суслов Денис Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: suslov1687@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.04.2025 г.

© Суслов Д.Ю., 2025

Suslov D.Y.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: suslov1687@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF TEMPERATURE AND FREQUENCY OF BIOMASS MIXING ON BIOMETHANE PRODUCTION

Abstract. The work is devoted to the study of the process of obtaining an alternative energy source - biomethane in an anaerobic methane tank equipped with a bubbling mixing system, during the disposal of pig waste. The most effective methods of increasing the efficiency of biomethane plants are to increase the mixing intensity and temperature of biomass. However, currently there are various data on the optimal temperature of the fermentation process and the frequency of mixing of biomass, so it is important to conduct research in this area and determine the optimal values of the parameters under study. A central composite rotatable plan for a complete factorial experiment with a total of 13 experiments was adopted for the research. Experimental studies of the process of obtaining biomethane during anaerobic fermentation of pig manure in a mesophilic temperature regime have been carried out. As a result of the implementation of the research plan, the surface of the response function was constructed and a regression equation was obtained that characterizes the effect of the bubbling frequency and biomass temperature on the biomethane yield. Graphical dependences of the specific biomethane yield on variable factors are constructed based on the regression equation. The optimal mode of operation of the biomethane installation has been established, which is achieved at a mixing intensity

of 3...5 days⁻¹ and a biomass temperature of 39.5...40.5 °C. The maximum specific yield of biomethane was 417.53 l/kg.

Keywords: biomethane, anaerobic fermentation, biomass temperature, bubbling mixing.

REFERENCES

1. Padi R.K., Douglas S., Murphy F. Techno-economic potentials of integrating decentralised biomethane production systems into existing natural gas grids. *Energy*. 2023. Vol. 283. 128542. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128542.
2. Negro V., Noussan M., Chiaramonti D. Alternative options for biogas-to-energy: A comparison of electricity and biomethane generation based on the real operation of a production site. *Applied Energy*, 2025. Vol. 377. Part D. 124687. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124687.
3. Ning X., Deng Ch., Hickey D.T., Hackula A., O'Shea R., Wall D. M., Lin R., Murphy J. D. Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 423. 138723. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138723.
4. Barbera E., Menegon S., Banzato D., D'Alpaos C., Bertucco A. From biogas to biomethane: A process simulation-based techno-economic comparison of different upgrading technologies in the Italian context. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 135. Pp. 663–673. DOI: 10.1016/j.renene.2018.12.052.
5. Al-Hamamre Z., Saidan M., Hararah M., Rawajfeh Kh., Alkhasawneh H. E., Al-Shannag M. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. Pp. 295–314. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.035.
6. Awasthi M.K., Sarsaiya S., Wainaina S., Rajendran K., Awasthi S. K., Liu T., Duan Y. Jain A., Sindhu R., Binod P., Pandey A., Zhang Z., Taherzadeh M. J. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. 110837. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110837.
7. Wang J., Chai Y., Shao Y., Qian X. Techno-economic Assessment of Biogas Project: a Longitudinal Case Study from Japan. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. 105174. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105174.
8. Jameel M.K., Mustafa M.A., Ahmed H.S., Mohammed A.J., Ghazy H., Shakir M.N., Lawas A.M., Mohammed S.K., Idan A.H., Mahmoud Z.H., Sayadi H., Kianfar E. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*. 2024. Vol. 7. 101549. DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101549.
9. Sher F., Smjecanin N., Hrnjic H., Karadza A., Omanovic R., Sehovic E., Sulejmanovic J. Emerging technologies for biogas production: A critical review on recent progress, challenges and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. Pp. 834–859. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.138.
10. Garkoti P., Ni J.-Q., Thengane S. K. Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. 114430. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114430.
11. Devi M.K., Manikandan S., Oviyapriya M., Selvaraj M., Assiri M.A., Vickram S., Subbaiya R., Karmegam N., Ravindran B., Chang S.W., Awasthi M.K. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 363. 127871. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127871.
12. Basinas P., Rusin J., Chamrádová K. Assessment of high-solid mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of mechanically-separated municipal solid waste. *Environmental Research*. 2021. Vol. 192. 110202. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110202.
13. Niu Q., Takemura Y., Kubota K., Li Yu.-Y. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: Microbial community dynamics and process resilience. *Waste Management*. 2015. Vol. 43. Pp. 114–122. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.012.
14. Bahadur A., Zhang L., Guo W., Sajjad W., Ilahi N., Banerjee A., Faisal S., Usman M., Chen T., Zhang W. Temperature-dependent transformation of microbial community: A systematic approach to analyzing functional microbes and biogas production. *Environmental Research*. 2024. Vol. 249. 118351. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118351.
15. Labatut R.A., Angenent L.T., Scott N.R. Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? *Water Research*. 2014. Vol. 53. Pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.035.
16. Białobrzewski I., Waszkielis K., Bułkowska K. The application of Anaerobic Digestion Model No. 1 for the optimization of biogas production from maize silage, pig manure, cattle manure, and digestate in a full-scale biogas plant. *Fuel*. 2024. Vol. 357, Part B. 129789. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129789.
17. Zhang L., Loh K.-C., Zhang J. Jointly reducing antibiotic resistance genes and improving methane yield in anaerobic digestion of chicken manure

by feedstock microwave pretreatment and activated carbon supplementation. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 372. Pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.207.

18. Lindmark J., Thorin E., Fdhila R. B., Dahlquist E. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. Pp. 1030–1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182.

19. Ratanatamskul C., Saleart T. Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester for conversion of food wastes to biogas and energy recovery. *Environ Sci Pollut Res*. 2016. No. 23. Pp. 7092–7098. DOI:10.1007/s11356-015-4448-0.

20. Babaei A., Shayegan J. Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester. *J Environ*

Health Sci Engineer. 2019. No. 17. Pp. 1077–1084. DOI:10.1007/s40201-019-00422-6.

21. Nauman M., Tayyab M., Faheem M., Ikram K., Akram M.W., Asif M., Omar M.M. Designing and performance evaluation of continuously stirring anaerobic batch reactor for biomethane production from biowaste. *Biomass Conv. Bioref*. 2024. No. 14. Pp. 18065–18078. DOI:10.1007/s13399-023-04203-y.

22. Sautin S.N. Experiment planning in chemistry and chemical technology. [Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii]. L.: Ximiya, 1975. 48 p. (rus).

23. Suslov D.Y., Sedyh P.S. Experimental studies of the process of obtaining biogas from wastes from agricultural enterprises. 2019 International Science and Technology Conference "EastConf". Vladivostok, 2019. 8725328. DOI:10.1109/Eastonf.2019.8725328.

Information about the authors

Suslov, Denis Yu. DSc. Professor E-mail: suslov1687@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 08.04.2025

Для цитирования:

Суслов Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния температуры и частоты перемешивания биомассы на производство биометана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62

For citation:

Suslov D.Y. Experimental studies of the effect of temperature and frequency of biomass mixing on biomethane production. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 54–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-54-62