

DOI  
УДК 662.767.2

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА НА КОЛИЧЕСТВО ПРОИЗВОДИМОГО БИОГАЗА

И. Г. Ахметова, О. В. Соловьева, С. А. Соловьев, Р. З. Шакурова

**Реферат.** На предприятиях агропромышленного комплекса (АПК) имеется большое количество отходов, часть которых не утилизируется. Данный факт приводит к ряду экологических проблем, таких как окисление почв и парниковый эффект, вызванный выбросами метана в атмосферу. Между тем отходы АПК являются отличным сырьем для производства биогаза – экологически чистого топлива, которое предприятия АПК могут использовать для собственной генерации тепла и электричества, таким образом, сократив объемы закупки энергии у генерирующих компаний. Помимо тепловой и электрической энергии, биогазовые технологии позволяют получать высококачественные удобрения, которые предприятия АПК в дальнейшем могут применять, например, для выращивания тепличных культур. В данной работе проведены исследования влияния скорости перемешивания отходов (биомассы) в биореакторе на количество произведенного биогаза. Исследования проводились при следующих скоростях перемешивания: 40, 70 и 100 об/мин. Результаты исследований показали, что при скорости перемешивания 40 об/мин в реакторе наблюдалось наличие «мертвых» зон, что говорит о низкой эффективности перемешивания биомассы. При скорости 70 об/мин наблюдается наиболее эффективное перемешивание биомассы в реакторе. Кроме того, при скорости мешалки 70 об/мин наблюдается максимальное суточное производство биогаза, а именно 1100 л. При скорости мешалки 100 об/мин наблюдалось заметное снижение количества производимого биогаза ввиду высокой интенсивности перемешивания. В целом в исследуемом временном периоде (17 дней) при скоростях перемешивания 40, 70 и 100 об/мин производится 9800, 10400 и 8000 л газа соответственно. Таким образом, наибольшая производительность биореактора достигается при скорости перемешивания биомассы 70 об/мин.

**Ключевые слова:** биогаз, отходы агропромышленности, биогазовая установка, скорость перемешивания, эффективность, энергия.

**Введение.** С развитием технологий и увеличением численности населения повышается потребность в тепловой и электрической энергии. Производство энергии традиционно осуществляется на тепловых электрических станциях, теплоэлектроцентралях, котельных, и сопряжено с сжиганием ископаемого топлива (угля, газа) [1]. Увеличение энергопотребления неизбежно ведет к росту вредных выбросов и парниковых газов, что негативно сказывается на состоянии окружающей среды и здоровье людей. Для сокращения выбросов вредных веществ (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и др.) всё большее распространение получают технологии выработки тепла и электричества на основе возобновляемых или альтернативных источников энергии. Применение возобновляемых источников энергии, таких как энергия солнца или энергия ветра, ограничено в связи с тем, что эффективность ветряных и солнечных электростанций зависит от ландшафта местности, климатических и погодных условий. Например, на территории России, солнечные панели целесообразно устанавливать лишь в южной части страны, а ветроэнергетические установки – на Дальнем Востоке и на крайнем севере. Хорошей альтернативой традиционным и возобновляемым источникам энергии являются биогазовые установки, позволяющие получать биогаз – экологически чистое топливо, сжигание которого позволяет не только получить тепловую и электрическую энергию, но и высококачественные органические удобрения [2]. Биогаз представляет

собой смесь из метана, углекислого газа, сероводорода, водорода и других газов. Биогаз получают в процессе анаэробного сбраживания биомассы, которая, как правило, состоит из отходов агропромышленного комплекса (АПК) и пищевой промышленности [3].

На предприятиях АПК имеется большое количество органических отходов. В России это количество достигает 600 млн. т в год, и большая часть отходов не утилизируется. В результате это приводит к ряду экологических проблем: выбросы метана в атмосферу (парниковый эффект), загрязнения грунтовых вод, окисление почв. Применение на предприятии АПК биогазовых установок позволяет решить проблемы экологии, снизить потребность предприятия в закупке тепловой и электрической энергии, а также получить высококачественные органические удобрения [4]. Биопереработка агропромышленных отходов приведет к оптимизации использования природных, человеческих и экономических ресурсов в производстве продуктов питания и кормов, а также позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду [5].

Эффективность и производительность биогазовой установки зависит от типа используемого сырья, химического состава отходов, скорости загрузки органических веществ, а также во многом от скорости перемешивания отходов в реакторе. Существуют несколько направлений исследований, нацеленных на повышение производительности и эффективности биогазовых реакторов: повышение

рабочей температуры, сбраживание с высоким содержанием твердых веществ, твердофазное сбраживание. Эти биотехнологии позволяют не только увеличить производительность и эффективность реактора, но также существенно уменьшить его габариты [6]. Также большое влияние на эффективность использования биомассы влияют методы сбора и предварительной обработки отходов. Применение биоперерабатывающих заводов в биоэкономике замкнутого цикла имеет значительный потенциал для производства биогаза и органических удобрений путем эффективного использования биоресурсов [7].

Многие ученые занимались исследованием влияния различных характеристик на эффективность биогазовой установки [8-13]. Young-JuSong и др. [14] провели экспериментальные исследования характеристик биогаза в зависимости от химического состава исходного сырья (пищевые отходы, навоз скота или осадок сточных вод). Результаты исследований показали, что наибольшее количество метана выделяется из пищевых отходов. Повышенное содержание метана в биогазе, в свою очередь, позволяет повысить выработку электрической энергии и снизить выбросы вредных веществ при сжигании биогаза. Dalpraz и др. [15] провели экспериментальные исследования по выработке тепловой и электрической энергии из биогаза с различным содержанием метана. Результаты исследований показали, что с увеличением содержания метана количество вырабатываемой электрической энергии растет: при содержании  $\text{CH}_4$  68,54% выработанная электроэнергия составляла 2,04 кВтч/м<sup>3</sup>; при содержании  $\text{CH}_4$  92,33% удалось выработать 3,57 кВтч/м<sup>3</sup> электроэнергии.

Bolzonella и др. [16] провели исследования по термодиффузионному постгидролизу биомассы для увеличения производства биогаза. Путем рециркуляции гидролизата обратно в реактор, авторам удалось добиться увеличения производства биогаза на 30%.

Cabello и др. [17] провели технико-экономический анализ применения химического петлевого сжигания для улавливания  $\text{CO}_2$  в биогазовой установке. Авторы пришли к выводу, что использование технологий улавливания диоксида углерода позволит использовать его в дальнейшем в сельском хозяйстве, например, для выращивания тепличных культур. Результаты исследований показали, что интеграция технологий химического петлевого сжигания и улавливания  $\text{CO}_2$  приведет к получению дополнительной прибыли за счет использования  $\text{CO}_2$  в теплицах для выращивания культур.

Авторы также исследовали целесообразность когенерационной выработки энергии в биогазовых установках, и пришли к выводу, что вырабатывать только тепловую энергию в биогазовых установках экономически нецелесообразно. Наибольшей эффективности

можно достичь путем выработки как тепловой, так и электрической энергии (когенерация).

Таким образом, применение биогазовых установок в агропромышленном комплексе – это эффективный способ утилизации отходов сельского хозяйства при одновременной генерации тепловой и электрической энергии. Окупаемость внедрения биогазовой установки в среднем составляет 3-7 лет [18].

Как упоминалось ранее, одним из направлений повышения эффективности биогазовой установки является оптимизация параметров смешивания отходов в биореакторе. Оптимальная скорость перемешивания позволяет ускорить процесс анаэробного брожения путем выравнивания, как температуры биомассы, так и концентрации анаэробных микроорганизмов. Интенсивность перемешивания влияет на эффективность производства биогаза, следовательно, влияет и на количество произведенной из биогаза энергии.

Целью данного исследования является определение влияния скорости перемешивания отходов (биомассы) в биореакторе на количество произведенного биогаза.

**Условия, материалы и методы.** Для проведения исследований применялась вычислительная гидродинамика (CFD). Было выполнено 3D-моделирование в ANSYSFluent с применением k-ε модели турбулентности. Для сокращения вычислительных затрат использовалась однофазная модель. Корпус мешалки с реакторной системой рассматривался как однофазная система, содержащая жидкую биомассу в соотношении отходов и воды 1:1.

После построения геометрии проводилась разбивка системы на расчетные зоны путем построения объемной сетки. Система состоит из двух расчетных областей: внутренняя область включает окружающую мешалку среду, поэтому размер ячеек во внутренней расчетной области был меньше, чем размер ячеек во внешней расчетной области. Затем на основе числа Рейнольдса, полученного из стандартной модели турбулентности k-ε, был выбран режим течения. Свойства биомассы, а именно плотность и вязкость, заимствованы из литературы [19].

**Результаты и обсуждение.** Проведены исследования влияния скорости движения рабочего колеса мешалки на генерацию биогаза. На рисунке 1 представлен суточный график выработки биогаза при различных скоростях движения рабочего колеса мешалки: 40, 70 и 100 об/мин. Необходимо отметить, что суточная выработка биогаза увеличивается до четвертого дня. С четвертого по восьмой день выработка газа уменьшается, так как на эти дни происходит процесс гидролиза. Начиная с девятого дня выход биогаза снова возрастает и достигает максимального значения на четырнадцатый день.

Необходимо отметить, что при скоростях перемешивания 40 и 70 об/мин тенденция

примерно одинаковая. Однако при скорости рабочего колеса 100 об/мин тенденция меняется. В этом случае производство биогаза

увеличивается до пятых суток, что объясняется усиленным перемешиванием и активными процессами тепло- и массообмена.

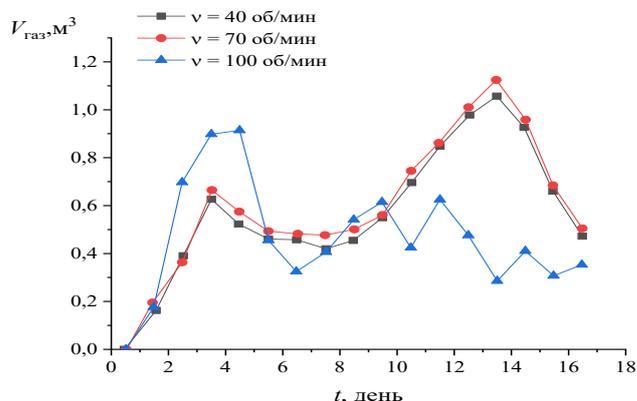


Рис. 1 - График суточной выработки биогаза при различных скоростях перемешивания

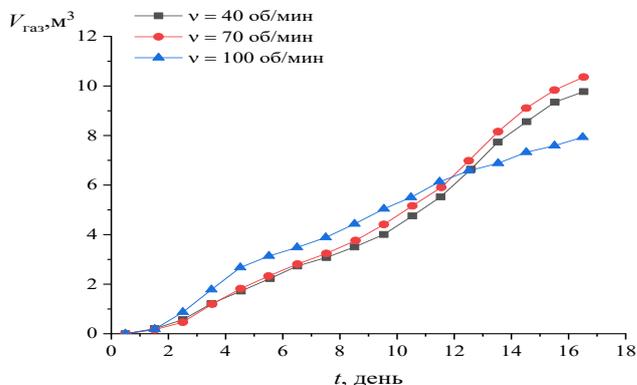


Рис. 2 - График общей выработки биогаза при различных скоростях перемешивания

Проанализируем график изменения общей выработки биогаза при различных скоростях перемешивания (рис. 2) за рассматриваемый промежуток времени (17 дней). В первые дни вырабатывается очень малое количество биогаза. В этот период основным источником производимого биогаза является двуокись углерода, содержание метана при этом довольно низкое. Это связано с происходящим в этот период гидролизом и подкислением биомассы. Начиная с третьего-четвертого дня выработка биогаза увеличивается, и растет содержание метана. Это связано с тем, что метаногенные бактерии размножаются, увеличивается их количество, что и приводит к образованию большого количества метана. В целом, по окончании 17 дней обработки биомассы при скоростях мешалки 40, 70 и 100 об/мин, произведено 9800, 10400 и 8000 л биогаза соответственно. Таким образом, максимальное количество биогаза производится при скорости мешалки в 70 об/мин, и в пиковый 14-й день составляет 1100 л. При скорости мешалки 100 об/мин в течение первых 11 дней наблюдается наибольшее производство биогаза по сравнению с результатами, полученными для других скоростей. Тем не менее, начиная с 12-го дня, тенденция

меняется ввиду интенсивного перемешивания, что и привело к уменьшению образования биогаза.

**Выводы.** Результаты численных исследований показали, что скорость рабочего колеса (40, 70 и 100 об/мин) оказывает значительное влияние на производительность биогазового реактора. Результаты исследования суточного производства биогаза при различных скоростях мешалки показали, что максимальная суточная выработка биогаза составила 1100 л при скорости мешалки 70 об/мин. При скорости 40 об/мин выработка биогаза ниже, чем при скорости перемешивания 70 об/мин, что объясняется наличием «мертвых» зон возле стенок реактора ввиду неэффективного перемешивания биомассы при такой скорости вращения. Высокоинтенсивное перемешивание также негативно влияет на количество производимого биогаза. Результаты исследований показали, что при скорости мешалки 100 об/мин наблюдается высокий уровень производства биогаза, но лишь до 11-го дня, после производство биогаза резко снижается. В целом по истечении 17-ти дней, при скоростях мешалки 40, 70 и 100 об/мин было произведено 9800, 10400 и 8000 л биогаза соответственно. Таким образом, можно

сделать вывод, что при скорости мешалки 70 об/мин можно произвести наибольшее количество биогаза и добиться наибольшей эффективности биогазовой установки.

#### Литература

1. Biogas potential, utilization and countermeasures in agricultural provinces: A case study of biogas development in Henan Province, China / M. Gao, D. Wang, H. Wang, X. Wang, Y. Feng // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Т. 99. P. 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.005>
2. Recent Advances in Biogas Production Using Agro-Industrial Waste: A Comprehensive Review Outlook of Techno-Economic Analysis / M.K. Devi, S. Manikandan, M. Oviyapriya et al. // *Bioresource Technology*. 2022. P. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871>
3. Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece / S. Alatzas, K. Moustakas, D. Malamis, S. Vakalis // *Energies*. 2019. Т. 12. №. 6. P. 1095. <https://doi.org/10.3390/en12061095>
4. Whiting A., Azapagic A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion // *Energy*. 2014. Т. 70. P. 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.103>
5. Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy / M. K. Awasthi, R. Sindhu, R. Sirohi et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Т. 158. P. 112122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112122>
6. Ellacuriaga M., García-Cascallana J., Gómez X. Biogas production from organic wastes: integrating concepts of circular economy // *Fuels*. 2021. Т. 2. №. 2. P. 144-167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>
7. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy / M. K. Awasthi, S. Sarsaiya, A. Patel // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Т. 127. P. 109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>
8. Valorising agro-industrial wastes within the circular bioeconomy concept: The case of defatted rice bran with emphasis on bioconversion strategies / M. Alexandri, J. P. López-Gómez, A. Olszewska-Widrat, J. Venus // *Fermentation*. 2020. Т. 6. №. 2. P. 42. <https://doi.org/10.3390/fermentation6020042>
9. From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? / L.C. Freitas, J.R. Barbosa, A.L. C. da Costa et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Т. 169. P. 105466. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>
10. Rice streams as a promising source of biofuels: feedstocks, biotechnologies and future perspectives / A.P. Gupte, M. Basaglia, S. Casella, L. Favaro // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Т. 167. P. 112673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112673>
11. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas / L. Yingjian, Q. Qi, H. Xiangzhu, L. Jiezhong et al. // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2014. Т. 6. P. 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.003>
12. Rotunno P., Lanzini A., Leone P. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel // *Renewable Energy*. 2017. Т. 102. P. 417-432. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.062>
13. Ugwu S. N., Enweremadu C. C. Ranking of energy potentials of agro-industrial wastes: Bioconversion and thermo-conversion approach // *Energy Reports*. 2020. Т. 6. P. 2794-2802. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.008>
14. Characteristics of biogas production from organic wastes mixed at optimal ratios in an anaerobic co-digestion reactor / Y.J. Song, K.S. Oh, B. Lee et al. // *Energies*. 2021. Т. 14. №. 20. P. 6812. <https://doi.org/10.3390/en14206812>
15. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste / R. Dalpaz, O. Konrad, C.C. da Silva Cyrne et al. // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Т. 40. P. 100774. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100774>
16. Biological thermophilic post hydrolysis of digestate enhances the biogas production in the anaerobic digestion of agro-waste / D. Bolzonella, F. Battista, A. Mattioli et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Т. 134. P. 110174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110174>
17. Techno-economic analysis of a chemical looping combustion process for biogas generated from livestock farming and agro-industrial waste / A. Cabello, T. Mendiara, A. Abad, J. Adánez // *Energy Conversion and Management*. 2022. Т. 267. P. 115865. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115865>
18. Блинова Л. А. Биогазовые установки как альтернативный источник энергии в АПК РФ // *Проблемы современной экономики*. 2012. С. 41-44.
19. Yu L., Ma J., Chen S. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester // *Bioresource technology*. 2011. Т. 102. №. 2. P. 1012-1018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.079>

#### Сведения об авторах:

Ахметова Ирина Гареевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой, e-mail: irina\_akhmetova@mail.ru

Соловьева Ольга Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: solovyeva.ov@kgeu.ru

Соловьев Сергей Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: solovev.sa@kgeu.ru

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант, e-mail: i@rshakurova.ru

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

#### STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MIXING RATE OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE ON THE AMOUNT OF PRODUCED BIOGAS

I. G. Akhmetova, O. V. Soloveva, S. A. Solovev, R. Z. Shakurova

**Abstract.** At the enterprises of the agro-industrial complex there is a large amount of waste, most of which is not recycled. This leads to a number of environmental problems, such as soil acidification and the greenhouse effect caused by methane emissions into the atmosphere. Meanwhile, waste from the agro-industrial complex (AIC) is an excellent raw material for the production of biogas, an environmentally friendly fuel that agribusiness enterprises can use for their own generation of heat and electricity, thus reducing the volume of energy purchases from generating companies. In addition to

heat and electricity, biogas technologies make it possible to obtain high-quality fertilizers, which agricultural enterprises can later use, for example, for growing greenhouse crops. In this paper, we studied the effect of the waste mixing rate in a bioreactor on the amount of biogas produced. The studies were carried out at the following mixing speeds: 40, 70 and 100 rpm. The research results showed that at a speed of 70 rpm, the most efficient mixing of the biomass in the reactor is observed. At a stirrer speed of 40 rpm, the presence of dead zones was observed in the reactor, which indicates a low efficiency of biomass mixing. In addition, at a stirrer speed of 70 rpm, the maximum daily production of biogas is observed, namely 1100 l. At a stirrer speed of 100 rpm, a noticeable reduction in the amount of biogas produced was observed due to the high mixing intensity. In general, in the studied time period (17 days), at mixing speeds of 40, 70 and 100 rpm, 9800, 10400 and 8000 liters of gas are produced, respectively. Thus, the highest performance of the bioreactor is achieved at a biomass stirring speed of 70 rpm.

**Key words:** biogas, agricultural waste, biogas plant, mixing rate, efficiency, energy.

#### References

1. Biogas potential, utilization and countermeasures in agricultural provinces: A case study of biogas development in Henan Province, China / M. Gao, D. Wang, H. Wang, X. Wang, Y. Feng // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 99. R. 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.005>
2. Recent Advances in Biogas Production Using Agro-Industrial Waste: A Comprehensive Review Outlook of Techno-Economic Analysis / M.K. Devi, S. Manikandan, M. Oviyapriya et al. // *Bioresource Technology*. 2022. R. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871>
3. Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece / S. Alatzas, K. Moustakas, D. Malamis, S. Vakalis // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 6. R. 1095. <https://doi.org/10.3390/en12061095>
4. Whiting A., Azapagic A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion // *Energy*. 2014. V. 70. R. 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.103>
5. Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy / M. K. Awasthi, R. Sindhu, R. Sirohi et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. V. 158. P. 112122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112122>
6. Ellacuriaga M., García-Cascallana J., Gómez X. Biogas production from organic wastes: integrating concepts of circular economy // *Fuels*. 2021. Vol. 2. No. 2. R. 144-167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>
7. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy / M. K. Awasthi, S. Sarsaiya, A. Patel // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. V. 127. R. 109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>
8. Valorising agro-industrial wastes within the circular bioeconomy concept: The case of defatted rice bran with emphasis on bioconversion strategies / M. Alexandri, J. P. López-Gómez, A. Olszewska-Widdrat, J. Venus // *Fermentation*. 2020. Vol. 6. No. 2. R. 42. <https://doi.org/10.3390/fermentation6020042>
9. From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? / L.C. Freitas, J.R. Barbosa, A.L. C. da Costa et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. V. 169. P. 105466. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>
10. Rice waste streams as a promising source of biofuels: feedstocks, biotechnologies and future perspectives / A.P. Gupte, M. Basaglia, S. Casella, L. Favaro // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. V. 167. P. 112673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112673>
11. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas / L. Yingjian, Q. Qi, H. Xiangzhu, L. Jiezhai et al. // *Sustainable energy technologies and assessments*. 2014. V. 6. R. 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.003>
12. Rotunno P., Lanzini A., Leone P. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 102. R. 417-432. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.062>
13. Ugwu S. N., Enweremadu C. C. Ranking of energy potentials of agro-industrial wastes: Bioconversion and thermo-conversion approach // *Energy Reports*. 2020. V. 6. R. 2794-2802. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.008>
14. Characteristics of biogas production from organic wastes mixed at optimal ratios in an anaerobic co-digestion reactor / Y.J. Song, K.S. Oh, B. Lee et al. // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 20. R. 6812. <https://doi.org/10.3390/en14206812>
15. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste / R. Dalpaz, O. Konrad, C.C. da Silva Cyrne et al. // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. V. 40. R. 100774. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100774>
16. Biological thermophilic post hydrolysis of digestate enhances the biogas production in the anaerobic digestion of agro-waste / D. Bolzonella, F. Battista, A. Mattioli et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. V. 134. P. 110174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110174>
17. Techno-economic analysis of a chemical looping combustion process for biogas generated from livestock farming and agro-industrial waste / A. Cabello, T. Mendiara, A. Abad, J. Adánez // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 267. R. 115865. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115865>
18. Blinova L. A. Biogas plants as an alternative source of energy in the agro-industrial complex of the Russian Federation // *Problems of the modern economy*. 2012. S. 41-44.
19. Yu L., Ma J., Chen S. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester // *Bioresource technology*. 2011. Vol. 102. No. 2. R. 1012-1018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.079>

#### Authors:

Akhmetova Irina Gareevna – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, e-mail: [irina\\_akhmetova@mail.ru](mailto:irina_akhmetova@mail.ru)  
 Soloveva Olga Victorovna – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [soloveva.ov@kgeu.ru](mailto:soloveva.ov@kgeu.ru)  
 Solovev Sergei Anatolievich – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [solovev.sa@kgeu.ru](mailto:solovev.sa@kgeu.ru)  
 Shakurova Rozalina Zufarovna – postgraduate student, e-mail: [i@rshakurova.ru](mailto:i@rshakurova.ru)  
 Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.