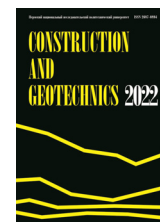




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 1, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.06

УДК 620.952: 697.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАНОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В МАЛОЭТАЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

К.В. Афонин, Т.С. Жилина, А.А. Загорская, М.Н. Павлова

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 26 декабря 2021
Одобрена: 01 февраля 2022
Принята к публикации:
03 марта 2022

Ключевые слова:

метановое брожение, вторичные энергетические ресурсы, твердые коммунальные отходы, биометан, биогаз, твердые коммунальные отходы.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены основные аспекты локальной утилизации отходов малоэтажной застройки путем метанового брожения с последующим получением вторичных энергетических ресурсов. В настоящее время генерация метана в искусственных условиях является интенсивно развивающейся отраслью. Предварительно авторами был изучен опыт регионов России по утилизации твердых бытовых отходов. Выявлено, что переработку твердых коммунальных отходов в биореакторах можно осуществлять при совместном сбраживании различных отходов. Также это возможно при добавлении существующих акселераторов для реакции метанового брожения. Дана оценка ресурсного потенциала сферы обращения с отходами в малоэтажном строительстве на юге Тюменской области. Изучены количественные характеристики отходов, образующихся на территории индивидуальной жилой малоэтажной застройки. Из общего объема, подлежащего утилизации, выделены отходы, потенциально пригодные для формирования исходного субстрата. Определены основные свойства сырья для необходимой генерации биометана. Рассчитан удельный выход метана в период его постоянной генерации для различных комбинаций коммунальных отходов малоэтажной застройки. В работе приведены общая концепция локальной переработки твердых коммунальных отходов и дано описание схемы метаногенерирующей установки. Определены габариты и технические характеристики установки для получения биометана из отходов по месту их образования в жилой застройке. Дополнительно проведен расчет произведенной на базе сгенерированного метана тепловой энергии. И установлено, что внедрение метаногенерирующих установок в технические системы малоэтажных зданий позволяет увеличить их энергоэффективность, снизить нагрузку на действующие полигоны твердых бытовых отходов и добиться максимальной утилизации отходов селитебных территорий.

© ПНИПУ

© **Афонин Константин Викторович** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: afoninkv@tyuiu.ru.

Жилина Татьяна Семеновна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: zhilinats@tyuiu.ru.

Загорская Алла Александровна – старший преподаватель, e-mail: zagorskajaaa@tyuiu.ru.

Павлова Мария Николаевна – студент, e-mail: pavmashanic@gmail.com.

Konstantin V. Afonin – Ph. D. in Technical science, Associate Professor, e-mail: afoninkv@tyuiu.ru.

Tatiana S. Zhilina – Ph. D. in Technical science, Associate Professor, e-mail: zhilinats@tyuiu.ru.

Alla A. Zagorskaya – Senior Lecturer, e-mail: zagorskajaaa@tyuiu.ru.

Maria N. Pavlova – Master student, e-mail: pavmashanic@gmail.com.

THE USE OF METHANOGENIC PLANTS BASED ON SOLID COMMUNAL WASTE IN LOW-RISE CONSTRUCTION

K.V. Afonin, T.S. Zilina, A.A. Zagorskaya, M.N. Pavlova

Industrial University of Tyumen, Construction Institute of Technology University, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 December 2021

Approved: 01 February 2022

Accepted for publication:

03 March 2022

Keywords:

methane fermentation, secondary energy resources, solid municipal waste, biomethane, biogas, solid municipal waste.

ABSTRACT

The authors consider the main aspects of local utilization of waste of low-rise buildings by methane fermentation with the subsequent production of secondary energy resources. Currently, the generation of methane in artificial conditions is an intensively developing industry. Previously, the authors studied the experience of the regions of Russia in the disposal of solid domestic waste. It is revealed that the processing of solid municipal waste in bioreactors can be carried out with the joint fermentation of various wastes. This is also possible by adding existing accelerators for the methane fermentation reaction. The quantitative characteristics of waste generated on the territory of individual residential low-rise buildings have been studied. From the total volume to be disposed of, waste potentially suitable for the formation of the initial substrate was isolated. The main properties of raw materials for the necessary generation of bio methane have been determined. The specific methane yield during its constant generation has been calculated for various combinations of municipal waste of low-rise buildings. The paper presents a general concept of local processing of municipal solid waste and describes the scheme of the methane generating plant. The dimensions and technical characteristics of the installation for obtaining bio methane from waste at the place of their formation in residential buildings have been determined. In addition, the calculation of thermal energy produced on the base on generated methane was carried out. And it was found that the introduction of methane-generating plants in the technical systems of low-rise buildings allows to increase their energy efficiency, reduce the load on existing landfills of solid domestic waste and achieve maximum utilization of waste from residential areas.

© PNRPU

Введение

Современный технический прогресс благодаря синтезу инжиниринга и экологии позволяет использовать отходы в качестве полезного сырья, трансформируя их в тепловую или электрическую энергию. Генерация метана в искусственных условиях – интенсивно развивающаяся отрасль. Так, по данным [1] прирост в использовании биометана составляет 2,2 % ежегодно. Согласно [2] в 2018 г. в Евросоюзе было установлено 18 202 биогазовых установки общей мощностью 2,28 млрд м³ биометана, что позволило генерировать 11 082 МВт электроэнергии. Различные методики получения метана на базе сельскохозяйственных отходов с применением микрокультур и разнообразных добавок широко представлены за рубежом в материалах [3–5].

Огромное внимание уделяется также подготовке полученного биогаза к использованию, процессам очистки и кондиционирования биометана в [6], техническим и экономическим аспектам применения биотоплива в [7–9].

Развитие технологий утилизации отходов производства и потребления актуально и для современной России. На данном этапе задано направление совершенствования нормативно-правового регулирования сферы обращения с отходами [10]. По сути, в России дан старт для создания новой технологичной отрасли российского производства, требующей актуальных технологий рекуперации отходов.

Российские источники рассматривают различные способы утилизации ТКО путем метанового брожения и различные способы интенсификации процесса (Г.А. Джамалова [11], Б.Б. Идигенов [12]; А.В. Садчиков [13]; Н.Ю. Курнакова [14], К.О. Оковитая [15], В.М. Кошелёв [16]). Из перечисленных источников следует, что переработка твердых коммунальных отходов централизованно или локально в биореакторах возможна при совместном сбраживании различных отходов или при добавлении акселераторов реакций метанового брожения. Таким образом, опыт других регионов может быть перенесен в Тюменскую область, ресурсный потенциал которой ежегодно составляет около 2,5 млн т отходов, из которых 56 % могут подвергаться метановому сбраживанию. На данном этапе развития отрасли вторичных материальных и энергетических ресурсов в Тюмени обезвреживаются только 73,5 % [17]. Основным способом обезвреживания промышленных и коммунальных отходов на территории Тюменской области служат полигоны, из которых только 74 % соответствуют санитарно-экологическим нормам. Остальная часть отходов распределяется по несанкционированным местам размещения, число которых ежегодно приближается к 200 [18].

Научная новизна предлагаемого исследования определяется тем, что в первую очередь создаваемые на основе разработанных нами проектных решений установки метаногенеза позволяют утилизировать до 75 % отходов селитебных территорий. Переработка отходов в анаэробных условиях позволяет решать еще одну актуальную проблему – создание новых источников возобновляемой энергии [19]. Кроме того, при сжигании биогаза можно получать как электричество, так и тепло, что приводит к экономии ресурсов. Этот аспект можно учитывать при сооружении автономных источников энергии в отдаленных регионах.

Основная часть

Целью работы стало моделирование метаногенирующей установки с загрузкой комбинированных отходов домохозяйств. Данная установка позволит не только вырабатывать метан в результате переработки отходов селитебных территорий и экономить до 17 % тепловой энергии на отопление зданий, но также решает вопрос с утилизацией побочных продуктов метаногенеза (углекислый газ и гумусообразный продукт).

Качественный и количественный состав отходов, образующихся на территории города Тюмени, изучался авторами ранее в [19; 20]. Субстрат для синтеза биогаза формировался из твердых коммунальных отходов, предварительно отсортированных, и отбросов бытовых сточных вод, представляющих собой влагонасыщенную смесь пищевых отходов, бумаги, текстиля и биоматериалов. На первой стадии из твердых отходов путем ручной сортировки были извлечены перерабатываемые компоненты (пластик, стекло, металл и т.д.). Отбросы бытовых сточных вод подвергаются декантации, после чего смесь отходов измельчается. Сравнение компонентов, подлежащих метановому сбраживанию в бытовых сточных водах (БСВ) и твердых коммунальных отходах (рис. 1), показывает наличие питательной среды для первого этапа выработки метана.

В табл. 1–3 приведены расчеты количества исходного сырья для получения метана в малоэтажном здании с коэффициентом семейности 4 и расчетное количество образующегося биометана. Поскольку сбраживание проходит в четыре этапа, важно контролировать загрузку метаногенирующей установки по мере образования твердых отходов. Поэтому необходимо оценивать поступление компонентов субстрата в разные промежутки времени для регулирования неравномерности поступления отходов.

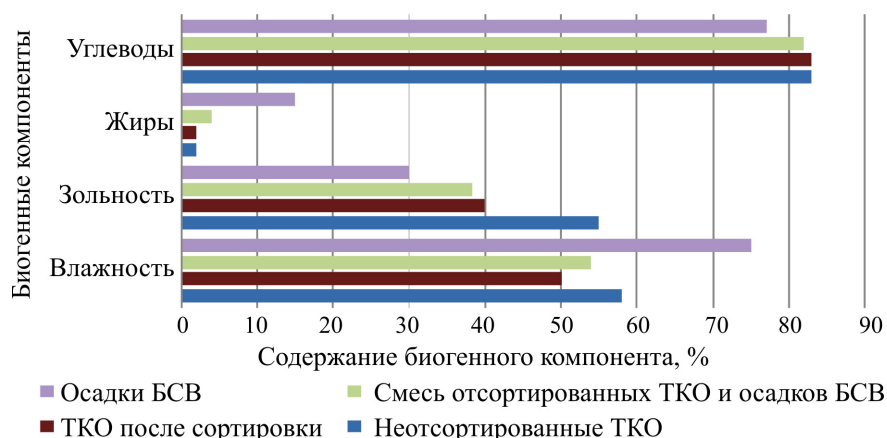


Рис. 1. Содержание биогенных компонентов в различных видах исходного сырья для метаногенеза
 Fig. 1. The content of biogenic components in various types of feedstock for methanogenesis

Таблица 1

Компоненты сточных вод, служащие питательной средой для метаногенеза

Table 1

Wastewater components serving as a nutrient medium for methanogenesis

Наименование показателя	Количество загрязняющих веществ					
	г/ч	г/сут	кг/сут	кг/нед	кг/мес	кг/год
Взвешенные вещества	10,83	260,00	0,26	1,82	7,28	87,36
БПК5	10,00	240,00	0,24	1,68	6,72	80,64
Общее количество	20,83	500,00	0,50	3,50	14,00	168,00

Примечание: БПК5 – биохимическое потребление кислорода за 5 сут.

Таблица 2

Количество твердых коммунальных отходов от одного домохозяйства

Table 2

The amount of municipal solid waste from one household

Наименование показателя	Количество загрязняющих веществ			
	кг/сут	кг/нед	кг/мес	кг/год
Твердые коммунальные отходы	3,57143	25	100	1200
Отбросы бытовых сточных вод	4,75	33,25	133	1596
Общее количество	8,32143	58,25	233	2796

Таблица 3

Общий выход метана на базе смешанного субстрата

Table 3

Total Methane Yield Based on Mixed Substrate

Наименование показателя	Удельное количество метана	Общий выход метана		Общий выход метана	
	кг/кг	кг/сут	кг/год	м ³ /сут	м ³ /год
Загрязнения сточных вод	0,219	0,11	36,72	0,09	30,10
Твердые коммунальные отходы	0,262	0,94	314,65	0,77	257,91
Отбросы бытовых сточных вод	0,181	0,86	288,876	0,70	236,78
Общее количество	—	1,91	640,246	1,56	524,79

В данном случае метаногенирующую установку можно будет использовать как оборудование для создания тепловой энергии. Данная установка сможет обеспечить отоплением малоэтажное строительство с этажностью не более двух-трех этажей.

По габаритам установка имеет следующие параметры: установка в разрезе с комплектующим оборудованием и со всех сторон, представленные на рис. 2–4.

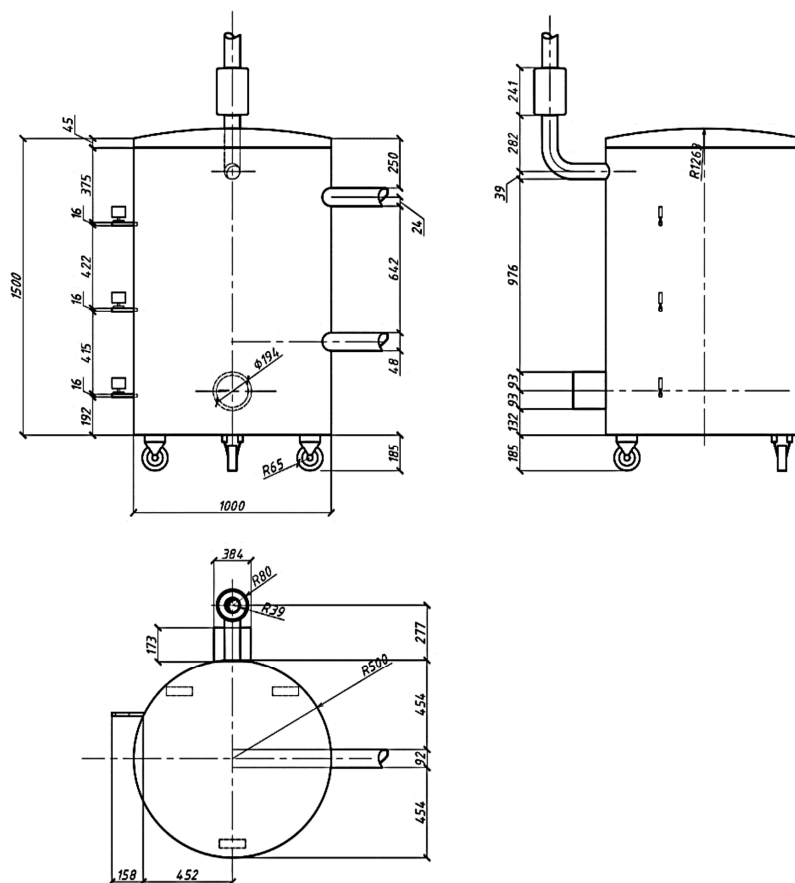


Рис. 2. Габариты метаногенирующей установки
 Fig. 2. Dimensions of the methane generating plant

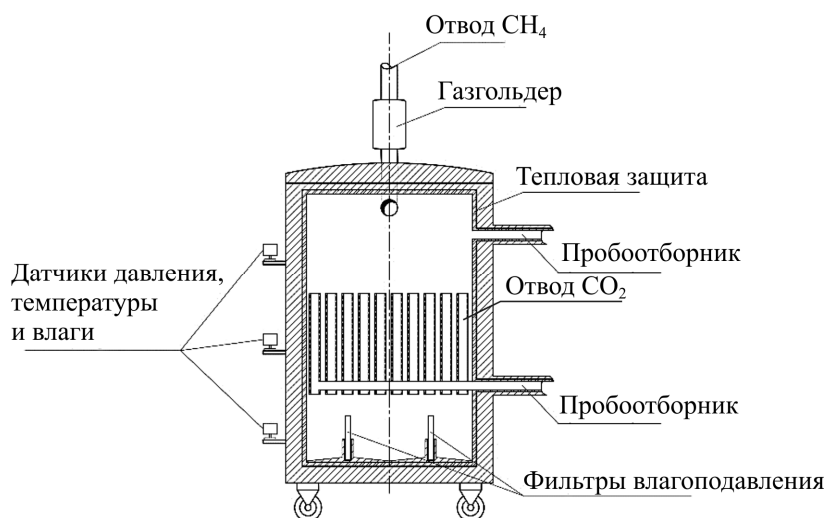


Рис. 3. Установка в разрезе
 Fig. 3. Sectional installation

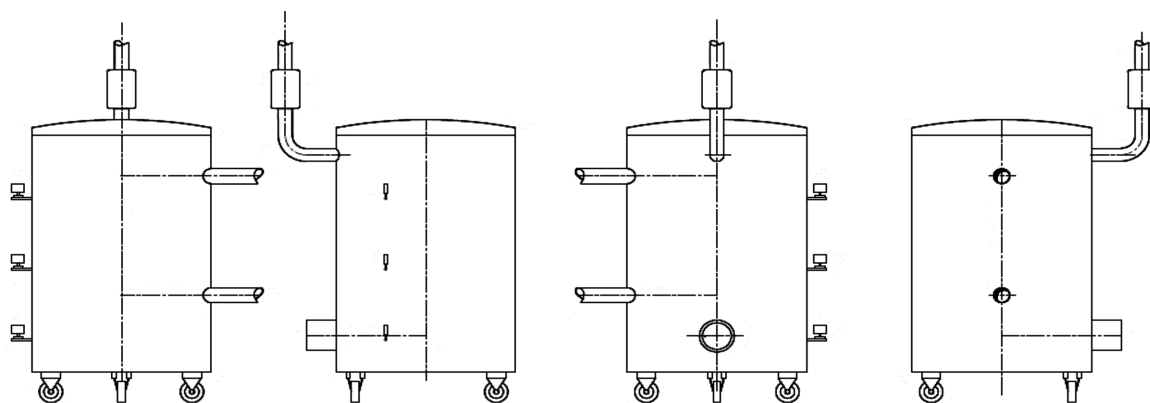


Рис. 4. Установка в четырех видах
Fig. 4. Installation from all sides

Существующие метаногенерирующие установки (МГУ) используются в основном для сбраживания жидких и пастообразных отходов, чаще всего сельскохозяйственных. Особое место занимают сооружения метанового брожения осадков очистных сооружений бытовой канализации. Особенностью таких МГУ являются значительные размеры и субстраты с другим соотношением биогенных компонентов (белков, жиров, углеводов), рассчитанные на другую влажность и зольность исходного сырья. В существующих установках метаногенеза процесс получения метана протекает, по сути, в естественных условиях, без устройств, позволяющих влиять на процесс, увеличивая выход биометана. Установок для генерирования метана на базе отходов селитебных территорий на российском технологическом рынке пока не представлено.

Максимальная загрузка установки 200–250 кг отходов в месяц. Установка способна производить до 500–600 м³ биометана в год. Количество тепловой энергии, получаемой на базе произведенного биометана, составляет 4129,608 кВт в год.

Выводы

1. Представленная установка может интегрироваться в систему жизнеобеспечения зданий.
2. Использование отходов для генерации вторичных энергетических ресурсов демонстрирует эффективность от 5 до 17 %.
3. Внедрение утилизации отходов селитебных территорий по месту образования имеет синергетический эффект, складывающийся из снижения площади полигонов ТКО, уменьшения логистических затрат на транспортировку отходов и увеличения общей энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства.
4. Внедрение отдельного сбора и установок локальной утилизации отходов повышает экологическую культуру населения в целом, что в конечном итоге повышает качество окружающей среды урбанизированных территорий.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Статистический отчет Европейской биогазовой ассоциации, 2020: Возобновляемый газ – истории успеха. – URL: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/12/EBA_Renewable-Gas-Success-Stories-2020.pdf (дата обращения: 15.12.2020).
2. Возобновляемые источники энергии 2019. Отчет о состоянии дел в мире. – URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (дата обращения: 15.12.2020).
3. Rajesh K. Srivastava. Bio-energy production by contribution of effective and suitable microbial system // *Materials Science for Energy Technologies*. –2019. – Vol. 2. – P. 308–318.
4. Siamak Farhad, YeongYoo, Feridun Hamdullahpur. Effects of fuel processing methods on industrial scale biogas-fuelled solid oxide fuel cell system for operating in wastewater treatment plants // *Journal of Power Sources*. – 2010. – Vol. 195, iss. 5. – P. 1446–1453.
5. Thermodynamic, economic and environmental assessment of energy systems including the use of gas from manure fermentation in the context of the Spanish potential / Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboa, Diego Iribarren, Diego García-Gusano, Javier Dufour // *Energy*. – 2020. – Vol. 200, № 117452.
6. Deep removal of sulfur and trace organic compounds from biogas to protect a catalytic methanation reactor / Adelaide S. Calbry-Muzyka, Andreas Gantenbein, Jörg Schneebeli, Alwin-Frei, Amy J. Knorpp, Tilman J. Schildhauer, Serge M.A. Biollaz // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 360. – P. 577–590.
7. Renewable energy, institutional stability, environment and economic growth nexus of D-8 countries / Mahjabeen, Syed Z.A. Shah, Sumayya Chughtai, Biagio Simonetti // *Energy Strategy Reviews*. – 2020. – Vol. 29, № 100484.
8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217327911>! Biogas as a co-firing fuel in thermal processing industries: implementation in a glass melting furnace / Marcel Fiehl, Jörg Leicher, Anne Giese, Klaus Görner, Bernhard Fleischmann, Simone Spielmann // *Conference: 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*. – Albufeira, Portugal, 2017.
9. Combustion and Emission Characteristics of a Spark Ignition Engine Fuelled with Biogas from Two-Phase Anaerobic Digestion (T-PAD) / Yang Zhang, Mingming Zhu, Zhezi Zhang, Dongke Zhang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 129. – P. 927–933.
10. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденная Указом Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176. – URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf> (дата обращения: 15.12.2020).
11. Джамалова Г.А. Анализ изменчивости качественного состава биогаза, производимого биореактором при интенсификации анаэробного разложения твердых бытовых отходов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 4.
12. Идигенов Б.Б., Садчиков А.В., Кокарев Н.Ф. Применение субстратов с быстрым расщеплением для повышения метаноотдачи биогазовых установок с комбинированной загрузкой // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 613.
13. Садчиков А.В. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 10, ч. 1. – С. 83–87.
14. Анализ развития производства биоэнергетического топлива / Н.Ю. Курнакова, Д.С. Католиченко, О. Сухарев, А.А. Волхонский // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 9, ч. 2. – С. 268–272.

15. Оковитая К.О., Суржко О.А. Аналитический обзор получения и использования биогаза. – URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_204_Surzko.pdf_89e5431c14.pdf (дата обращения: 30.03.2020).
16. Кошелев В.М., Нургалиев Т.И. Оценка рисков проектов по производству биогаза в России // Известия ТСХА. – 2016. – № 5. – С. 108–118.
17. Доклад об информации правительства Тюменской области о реализации в Тюменской области Федерального закона «Об отходах производства и потребления»: постановление № 775: принято Тюменской областной Думой 20 декабря 2012 г. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/428569920> (дата обращения: 15.12.2020).
18. Щуркова Н.И. Биогаз как источник чистой энергии. – URL: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5955> (дата обращения: 30.03.2020).
19. Zhilina T., Afonin K., Zagorskaya A. Reduction of environmental impact of solid domestic landfills of residential area due to their recycling // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 106. – № 07004.
20. Афонин К.В., Жилина Т.С., Загорская А.А. Переработка отходов селитебных территорий с целью получения вторичных энергетических и материальных ресурсов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2017. – № 4 (33). – С. 65–73.

References

1. Statistical Report of the European Biogas Association, 2020: Renewable Gas-Success Stories – [European Biogas Association]. Available at: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/12/EBA_Renewable-Gas-Success-Stories-2020.pdf (accessed 15 December 2020).
2. Renewables 2019. Global status report. [REN21]. AdobeAcrobatReader. Available at: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (accessed 15 December 2020).
3. Rajesh K. Srivastava. Bio-energy production by contribution of effective and suitable microbial system. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, vol. 2, pp. 308-318.
4. Siamak Farhad, Yeong Yoo, Feridun Hamdullahpur. Effects of fuel processing methods on industrial scale biogas-fuelled solid oxide fuel cell system for operating in wastewater treatment plants. *Journal of Power Sources*, 2010, vol. 195, iss. 5, pp. 1446-1453.
5. Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboa, Diego Iribarren, Diego García-Gusano, Javier Dufour. Thermodynamic, economic and environmental assessment of energy systems including the use of gas from manure fermentation in the context of the Spanish potential. *Energy*, 2020, vol. 200, no. 117452.
6. Adelaide S.Calbry-Muzyka, Andreas Gantenbein, Jörg Schneebeli, Alwin Frei, Amy J. Knorpp, Tilman J. Schildhauer, Serge M. A. Biollaz. Deep removal of sulfur and trace organic compounds from biogas to protect a catalytic methanation reactor. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 360, pp. 577-590.
7. Mahjabeen, Syed Z.A. Shah, Sumayya Chughtai, Biagio Simonetti. Renewable energy, institutional stability, environment and economic growth nexus of D-8 countries. *Energy Strategy Reviews*, 2020, vol. 29, no. 100484.
8. Marcel Fiehl, Jörg Leicher, Anne Giese, Klaus Görner, Bernhard Fleischmann, Simone Spielmann <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217327911> -. Biogas as

a co-firing fuel in thermal processing industries: implementation in a glass melting furnace. *11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*. Albufeira, Portugal, 2017.

9. Yang Zhang, Mingming Zhu, Zhezi Zhang, Dongke Zhang. Combustion and Emission Characteristics of a Spark Ignition Engine Fuelled with Biogas from Two-Phase Anaerobic Digestion (T-PAD). *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 129, pp. 927-933.

10. The strategy of environmental safety of the Russian Federation for the period up to 2025, approved by the Decree of the President of the Russian Federation of April 19, 2017 N 176 [President of Russia]. Available at: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf> (accessed 15 December 2020).

11. Dzhamalova G.A. Analysis of the variability of the qualitative composition of biogas produced by the bioreactor during the intensification of the anaerobic decomposition of municipal solid waste. *Modern problems of science and education*, 2015, no. 4.

12. Idigenov B.B, Sadchikov A.V, Kokarev N.F. Application of substrates with rapid decomposition to increase methane recovery of biogas plants with combined loading. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 613.

13. Sadchikov A.V. Increasing the energy efficiency of biogas plants. *Fundamental research*, 2016, no. 10 (part 1), pp. 83-87.

14. Kurnakova N.Yu. Katolichenko D.S., Sukharev O., Volkhonsky A.A. Analysis of the development of bioenergy fuel production. *Fundamental research*, 2016, no. 9 (part 2), pp. 268-272.

15. Okovitaya K.O., Surzhko O.A. An analytical review of the production and use of biogas [Engineering Bulletin of the Don]. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_204_Surzko.pdf_89e5431c14.pdf (accessed 30 March 2020).

16. Koshelev V.M., Nurgaliev T.I. Risk Assessment of biogas projects in Russia. *Izvestia TSKHA*, 2016, no. 5, pp. 108-118.

17. Report on the information of the government of the Tyumen region on the implementation in the Tyumen region of the federal law "On production and consumption wastes": Resolution No. 775: adopted by the Tyumen Regional Duma on December 20, 2012. [Government of the Tyumen region]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/428569920> (accessed 15 December 2020).

18. Shchurkova, N.I. Biogaz as source of net energy. [Youth and science: materials VII of the All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. Available at: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5955> (accessed 30 March 2020).

19. T. Zhilina, K. Afonin, A. Zagorskaya. Reduction of environmental impact of solid domestic landfills of residential area due to their recycling. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 106, no. 07004

20. Afonin K.V., Zhilina T.S., Zagorskaya A.A. Residential waste recycling in order to obtain secondary energy and material resources. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2017, no. 4/33, pp. 65-73.