

О ПРИМЕНЕНИИ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БИОГАЗЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnina@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.В. Шалухо

ORCID: 0000-0002-8235-0658 e-mail: shaluho@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Ворошилов

e-mail: alejandro.voroshilov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Утилизация отходов – острейшая проблема современной цивилизации. В России существенная доля отходов приходится на сельскохозяйственное производство, в том числе 56 % – на животноводческие предприятия. Вместе с тем, широкое внедрение высокотехнологичного оборудования на современных сельскохозяйственных объектах предъявляет повышенные требования к надежности их электрооборудования, качеству электрической энергии и ее эффективному использованию. В статье рассмотрен подход к повышению экологической и энергетической безопасности животноводческих предприятий за счет применения собственных источников энергии, работающих на биогазе из переработанных отходов. Дана характеристика биомассы и приведены результаты сравнительного анализа энергоустановок на биогазе. Преимущества твердооксидных топливных элементов обуславливают перспективность их использования для электрооборудования сельскохозяйственных объектов. Определены проблемы и поставлены задачи, которые необходимо решить при интеграции твердооксидных топливных элементов на биогазе в системы электрооборудования животноводческих предприятий.

Ключевые слова: биогаз, животноводческие предприятия, производственные отходы, твердооксидные топливные элементы, экологическая безопасность, энергетическая безопасность.

Для цитирования: Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Ворошилов А.А. О применении твердооксидных топливных элементов на биогазе для электрооборудования животноводческих предприятий // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 126-134. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_126

ON APPLICATION OF SOLID OXIDE FUEL CELLS ON BIOGAS FOR POWER SUPPLY OF LIVESTOCK ENTERPRISES

E.N. Sosnina

ORCID: **0000-0001-6207-9103** e-mail: sosnina@nntu.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

A.V. Shalukho

ORCID: **0000-0002-8235-0658** e-mail: shaluho@nntu.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

A.A. Voroshilov

e-mail: alejandro.voroshilov@yandex.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract. Waste disposal is the most acute problem of modern civilization. In Russia, a significant share of waste comes from agricultural production, including 56% from livestock enterprises. At the same time, the widespread introduction of high-tech equipment at modern agricultural facilities imposes increased requirements on the reliability of their power supply, the quality of electrical energy and its efficient use. The article considers an approach to improving the environmental and energy safety of livestock enterprises through the use of their own energy sources that run on biogas from recycled waste. The characteristics of biomass are given and the results of a comparative analysis of biogas power plants are presented. The advantages of solid oxide fuel cells determine the prospects for their use for the power supply of agricultural facilities. Problems are identified and tasks are set that need to be solved when integrating solid oxide fuel cells on biogas into the power supply systems of livestock enterprises.

Keywords: industrial waste, livestock enterprises, environmental safety, energy security, biogas, solid oxide fuel cells.

For citation: E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and A.A. Voroshilov, "On application of solid oxide fuel cells on biogas for power supply of livestock enterprises", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 126-134, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_126

I. Введение

Для России острой проблемой связана с превышением темпов накопления отходов над их переработкой и утилизацией. Ежегодный рост накопления отходов оценивается около 4 млрд т, что крайне отрицательно сказывается на экологии и здоровье населения [1].

На рис. 1 представлена классификация отходов по агрегатному состоянию, месту возникновения, составу и возможности повторного применения.



Рис. 1. Классификация отходов

Fig. 1. Waste classification

В суммарном количестве всех отходов существенную долю составляет сельскохозяйственное производство [2]. По данным Министерства сельского хозяйства РФ, в агропромышленном комплексе ежегодно генерируется более 770 млн т отходов. По разным источникам, общее количество сельскохозяйственных отходов достигает 630-650 млн т, к ним относятся органические отходы отраслей растениеводства, животноводства и перерабатывающей промышленности. Наибольшая часть сельскохозяйственных отходов приходится на животноводство (56 %), отходы растениеводства составляют 35,6 % [3].

По степени негативного влияния на окружающую среду отходы разделяются на пять классов: от чрезвычайно опасных (1 класс) до практически безопасных (5 класс) [4]. В отходах животноводческих предприятий преобладают навоз и помет. В соответствии с классификацией эти отходы относятся к III-V классам опасности и требует особого порядка обращения (лицензирования деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и др.) [5].

Повышение эффективности переработки отходов требует создания современных перерабатывающих комплексов и технологий. При этом следует опираться на передовые и перспективные решения в смежных отраслях. Так, для сельскохозяйственной отрасли проблема утилизации отходов должна решаться с учетом других важных проблем, в частности, вопроса обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей электроэнергии.

II. Характеристика потребителей электроэнергии животноводческих предприятий

Среди животноводческих предприятий наиболее крупными потребителями электрической энергии являются:

- 1) птицефабрики (до 1350 кВт);
- 2) комбикормовые заводы (до 1290 кВт);
- 3) фермы по выращиванию и откорму крупного рогатого скота (до 450 кВт);
- 4) птицефермы (до 280 кВт).

К основным потребителям предприятий животноводства относятся: системы вентиляции и отопления, компрессоры, освещение, кормоприготовительные машины (дробилки и кормосмесители), транспортеры, кормораздатчики. По категории бесперебойности электроснабжения электроприемники относятся к I и II категориям. Наибольшее количество электроприемников I категории установлено на предприятиях молочного животноводства, где отключение электропитания грозит серьезным технологическим и экономическим ущербом.

Проблемы низкого качества электроснабжения животноводческих предприятий связаны с рядом факторов: значительная удаленность от электростанций, высокий износ имеющейся электросетевой инфраструктуры, неравномерность нагрузки, экономические потери (хищения и потери на транспорт) и пр. Эффективный подход к повышению качества и надежности электроснабжения заключается в применении собственных (распределенных) источников электроэнергии. Это позволит увеличить уровень энергетической безопасности предприятий (соответственно, уровень продовольственной безопасности).

Применительно к животноводческим предприятиям наиболее эффективным решением представляется использование собственных источников электроэнергии, работающих на топливе из биомассы, преимуществом которых является возможность решения с их помощью проблем утилизации отходов.

III. Характеристика биомассы и анализ энергоустановок, работающих на биогазе

К биомассе относят все виды веществ растительного и животного происхождения, продукты жизнедеятельности организмов, а также органические отходы, образующиеся в процессе производства и потребления продукции [6]. Современный вариант использования биомассы заключается в ее переработке и получении биотоплива на основе эффективных технологий конверсии, позволяющих производить биотопливо в твердой (топливные пеллеты и брикеты), жидкой (биоэтанол, биометанол и биодизель) и газообразной (биогаз) формах. Относительно высокая энергетическая ценность и простота добычи делают биогаз наиболее перспективным топливом для

применения в электрогенерирующих установках [7]. Он представляет собой смесь, состоящую на 50-87 % из метана, 13-50 % из CO_2 , а также включает незначительные примеси H_2 (1-1,5 %) и H_2S (0,2-0,2 %) [8]. Теплота сгорания $1,0 \text{ м}^3$ биогаза составляет 20-25 МДж, что может быть сопоставлено с $0,60 \text{ м}^3$ природного газа, 0,74 л нефти, 0,65 л дизельного топлива или 0,48 л бензина [9]. Сырьем для производства биогаза могут служить навоз, птичий помет, фекальные осадки, отходы забойного цеха, бытовые отходы, отходы молокозаводов и т.д.

Для производства электрической энергии на основе биогаза требуется комплексное применение специальных установок для получения биогаза и энергоустановок, работающих на нем. В зависимости от применяемого сырья выделяют три вида установок для получения биогаза:

- 1) сельскохозяйственные биогазовые установки, использующие зеленую массу, не подвергшуюся первичной переработке, или отходы жизнедеятельности сельскохозяйственных животных;
- 2) ферментационные биогазовые установки, использующие смесь сельскохозяйственного сырья и органических отходов, подвергшихся первичной переработке;
- 3) утилизационные биогазовые установки, использующие различные биологические отходы, ферментация которых не противоречит санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Для производства электрической и тепловой энергии на основе биогаза могут использоваться различные типы энергоустановок: газотурбинные (ГТУ), газопоршневые (ГПУ), парогазовые (ПГУ), топливные элементы (ТЭ). В табл. 1 представлен сравнительный анализ энергоустановок, работающих на биогазе. Энергоустановки на топливных элементах (ЭУ на ТЭ) имеют наибольший показатель по сравниваемым характеристикам и, следовательно, позволяют наиболее эффективно использовать биогаз. К таким топливным элементам относятся твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ).

IV. Энергоустановки на ТОТЭ, работающие на биогазе

ТОТЭ являются топливными элементами с наибольшей рабочей температурой (от 650 до 1000 °С). Они наименее чувствительны к содержанию в биогазе примесей, поскольку биогаз выступает в электрохимической реакции катализатором, а не топливом, которое высвобождает энергию в процессе сгорания.

Таблица 1.
Сравнительный анализ энергетических установок малой генерации

Table 1.
Comparative analysis of power plants of small generation

Характеристики эффективности	ГТУ	ГПУ	ПГУ	ЭУ на ТЭ
Электрический КПД первичного двигателя, %	25-35	40-45	38	50-55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70-92	75-80	до 95
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г/кВт·ч	300- 615	360- 610	297- 370	210- 340

Применение ТОТЭ позволяет получить высокий электрический КПД (до 60 %) и экологически чистый состав продуктов реакции (водяной пар, азот, углекислый газ). Вследствие низкой деградации материалов срок службы ТОТЭ оценивается более 20 000 ч. Высокая температура также позволяет использовать топливо без специальной предварительной обработки и осуществлять комбинированное производство электрической и тепловой энергии. Техническую и экономическую целесообразность применения ТОТЭ показывает проект *DEMOSOFC* [10]. В рамках проекта для питания установки по очистке сточных вод использованы три модуля ТОТЭ по 58 кВт. Топливом является биогаз, который производится на месте путем анаэробного сбраживания осадка из очищенных сточных вод.

Однако из-за высоких рабочих температур ТОТЭ характеризуется значительным временем для выхода на оптимальный режим работы и низкой маневренностью [11]. Это снижает эффективность применения ТОТЭ при частых запусках и остановках энергоустановок на их основе (например, в периоды недоступности биогаза) и существенно затрудняет применение ТОТЭ в системах электроснабжения.

Энергоустановки с ТОТЭ, работающие на биогазе из производственных отходов, являются перспективным решением автономного источника энергии для питания животноводческих предприятий. Высокая энергетическая эффективность и отсутствие высоких требований к качеству топлива выделяют их по сравнению с другими типами источников энергии. Однако интеграция энергоустановок на ТОТЭ в системы электроснабжения предприятий требует решения целого ряда задач, связанных с разработкой схемотехнических решений их подключения, методов выбора их оптимальных параметров, алгоритмов управления.

В. Выводы

1. Для животноводческих предприятий проблема утилизации отходов должна решаться в сочетании с обеспечением надежного и качественного электроснабжения использованием собственных источников электроэнергии, работающих на топливе из биомассы.

2. Наиболее перспективным топливом, получаемым из биомассы, для применения в локальных источниках является биогаз. На биогазе могут работать многие типы энергоустановок (ГТУ, ГПУ, ПГУ и др.) Однако наибольшими преимуществами (высокой энергетической эффективностью и отсутствием завышенных требований к качеству топлива) обладают ТОТЭ.

3. Значительное время выхода на оптимальный режим работы и низкая маневренность затрудняют интеграцию ТОТЭ в системы электроснабжения животноводческих предприятий.

© Соснина Е.Н., 2022

© Шалухо А.В., 2022

© Ворошилов А.А., 2022

Поступила в редакцию 01.11.2022

Received 01.11.2022

Библиографический список

- [1] Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 220 с.
- [2] Сельское хозяйство в России. 2021. М.: Росстат, 2021. – 100 с.
- [3] Ветошкин А.Г. Техника и технология обращения с отходами жизнедеятельности. Часть 2. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 381 с.
- [4] Приказ Росприроднадзора № 242 от 22.05.2017. Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов (редакция от 02.11.2018).
- [5] Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 г. Об отходах производства и потребления (редакция от 17.07.2022).
- [6] ГОСТ Р 52808-2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. Введ. 2007-12-27. М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.
- [7] Achitayev A.A., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Zhidkov A.A., Evseenkov P.N. Land-fill gas generation projects implementation // proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [8] Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982. – 148 с.
- [9] Курманов А.К. Совершенствование технологии производства биогаза // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. №3. С. 170-176.

- [10] Gandiglio M., Lanzini A., Santarelli M., Acri M., Hakala T., Rautanen M. Results from an industrial size biogas-fed SOFC plant (the DEMOSOFC project) // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. № 45. P. 5449-5464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.022
- [11] Sosnina E.N., Shalukho A.V., Veselov L.E. Multi-agent approach to sofc-based generation system control // *proc. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sept. 24-26, 2021, Magnitogorsk, Russia, pp. 603-607. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559521

References

- [1] L.B. Khoroshavin, V.A. Belyakov and E.A. Svalov, *Osnovnye tehnologii pererabotki promyshlennyh i tverdyh kommunal'nyh othodov [Basic technologies for the processing of industrial and municipal solid waste]*. Yekaterinburg: Ural University publishing house, 2016 (in Russian).
- [2] *Sel'skoye khozyaystvo v Rossii. 2021 [Agriculture in Russia. 2021]*. Moscow: Rosstat, 2021 (in Russian).
- [3] A.G. Vetoshkin, *Tehnika i tehnologiya obrashheniya s othodami zhiznedejatel'nosti. Chast' 2 [Technique and technology for waste management. Part 2]*. Vologda: Infra-Engineering, 2019 (in Russian).
- [4] Order of Rosprirodnadzor No. 242 dated May 22, 2017 “Ob utverzhdenii Federal'nogo klassifikatsionnogo kataloga othodov [On the approval of the Federal classification catalog of waste]” (as amended on November 2, 2018).
- [5] Federal Law No. 89-FZ dated June 24, 1998 “Ob othodah proizvodstva i potrebleniya [On production and consumption waste] (as amended on July 17, 2022).
- [6] Non-traditional technologies. Energy of biowaste. Terms and Definitions, GOST R 52808-2007, Dec. 2007.
- [7] A.A. Achitaev, S.A. Eroshenko, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, “Land-fill gas generation projects implementation”, in *proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [8] Baader V., Done E., Brenderfer M. *Biogaz: teoriya i praktika [Biogas: theory and practice]*. Moscow: Kolos, 1982 (in Russian).
- [9] A.K. Kurmanov, “Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva biogaza [Improvement of biogas production technology]”, *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizatsii zhivotnovodstv [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Livestock Mechanization]*, no. 3, pp. 170-176, 2014 (in Russian).
- [10] M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, M. Acri, T. Hakala and M. Rautanen, “Results from an industrial size biogas-fed SOFC plant (the DEMOSOFC project)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 45, pp. 5449-5464, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.022
- [11] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and L.E. Veselov, “Multi-agent approach to SOFC-based generation system control”, in *proc. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sep. 24-26, 2021, Magnitogorsk, Russia, pp. 603-607, DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559521

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Elena N. Sosnina, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Шалухо Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Andrey V. Shalukho, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Ворошилов Александр Андреевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexander A. Voroshilov, postgraduate student of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation