

ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 502.3, 504.062:579.64:620.97:662.767.2:663.18
doi:10.23968/2305–3488.2017.21.3.3–12

Ковшов С. В., Скамьин А. Н., Иванов В. В.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОГАЗВЕРМИТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

UDC 502.3, 504.062:579.64:620.97:662.767.2:663.18
doi:10.23968/2305–3488.2017.21.3.3–12

Kovshov S. V., Skamyin A. N., Ivanov V. V.

ENERGY PERFORMANCE OF THE BIOGAS-VERMITECHNOLOGY PROCESS**Аннотация**

Введение: в условиях реформирования энергетической отрасли проблема оптимизации расходов потребителей на оплату электроэнергии является актуальной. Доля возобновляемой энергии в общей структуре производства электроэнергии будет неуклонно возрастать. Для производства такой энергии предлагается использование биогазового метода переработки отходов. **Цель:** предложить модель производства энергии на основе переработки промышленных и сельскохозяйственных отходов с помощью биогазовой технологии и вермитехнологии. Рассчитать эффект экономии при использовании метода выравнивания нагрузки. Повысить возможности системы по передаче электроэнергии. **Методы:** создан экспериментальный стенд, на котором технологически были объединены в один блок методы получения биогаза и вермитехнологический метод. Оценен эффект увеличения КПД производства электроэнергии и возможность использования высвободившейся мощности. **Результаты:** выравнивание графика энергопотребления предприятий позволяет увеличить КПД производства электроэнергии в абсолютном вы-

Abstract

Introduction: in reforming the energy sector, the consumer expenses optimization problem is relevant. The percentage of renewable energy in the total electricity production will increase steadily. For the production of renewable energy, it is suggested the biogas method of recycling. **Purpose:** to propose a model of energy production based on the processing of industrial and agricultural wastes through biogas technology and vermitechnology. To calculate the saving effect when using the load balancing method. To enhance the electricity transmission possibilities of the system. **Methods:** an experimental stand was created. Biogas method and vermitechnology section were combined into one unit. It was evaluated the effect of increasing the efficiency of electricity production and the possibility of using the remaining capacity was estimated. **Results:** the alignment of the enterprises energy consumption graph allows to increase the efficiency of electricity production in absolute terms by 4% and relative by 12.3%. The effect is achieved due to the redistribution of the energy consumed during the day by reducing downtime of the generating capacity. It is shown that by controlling the consumption of electrical energy it is possi-



ражении на 4% и в относительном на 12,3%. Эффект достигнут за счет перераспределения потребляемой энергии в течение суток при снижении времени простоя генерирующих мощностей. Показано, что путем регулирования потребления электрической энергии возможно уменьшить расход органического топлива для ее выработки. **Практическая значимость:** предполагается, что новый комбинированный метод использования биогазовой технологии и вермитехнологии с целью получения дополнительной энергии позволит заметно снизить расход органического топлива для выработки электроэнергии и увеличить КПД. Кроме того, дополнительным продуктом данного совместного метода переработки отходов является биогумус – ценное органическое удобрение.

Ключевые слова: энергоэффективность, КПД, выравнивание электрической нагрузки, возобновляемая энергия, биогазвермитехнология.

Авторы

Ковшов Станислав Вячеславович

Кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности производств
Санкт-Петербургский Горный университет
Тел. 8 (812) 328-86-23
Эл. адрес: kovshovsv@spmi.ru

Скамьин Александр Николаевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики
Санкт-Петербургский Горный университет
Тел. 8 (812) 328-86-23
Эл. адрес: askamin@yandex.ru

Иванов Владимир Викторович

Кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых
Санкт-Петербургский Горный университет
Тел. +7 (911) 230-27-96
Эл. адрес: vladimirivanov@inbox.ru

ble to reduce the intake of fossil fuels for energy generation. **Practical relevance:** it is expected that the new combined method of using biogas technology and vermitechnology with the aim of additional energy obtaining will significantly reduce the consumption of fossil fuels to generate electricity and increase efficiency. Furthermore, an additional product of this collaborative method of waste recycling is biohumus – a valuable organic fertilizer.

Keywords: energy performance, coefficient of efficiency, electrical load alignment, renewable energy, biogas-vermitechnology.

Authors

Stanislav Vyacheslavovich Kovshov

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor at Department of Industrial Safety
St. Petersburg Mining University
Tel. 8 (812) 328-86-23
E-mail: kovshovsv@spmi.ru

Aleksandr Nikolaevich Skamyin

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor at Department of Electrical Power Engineering and Electromechanics
St. Petersburg Mining University
Tel. +7 (812) 328-86-23
E-mail: askamin@yandex.ru

Vladimir Viktorovich Ivanov

Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor at Department of Mining Engineering
St. Petersburg Mining University
Tel. +7 (911) 230-27-96
E-mail: vladimirivanov@inbox.ru

Введение

В России в 2013 г. принято постановление, касающееся стимулирования использования возобновляемых источников энергии и компенсации тарифов с целью повышения ее конкурентоспособности. Эта система будет способствовать генерации и продаже возобновляемой энергии [1].

Россия располагает значительными потенциальными возможностями производства биогаза из навоза сельскохозяйственных животных. Ежегодно на животноводческих фермах страны образуется 665 млн т навоза, из каждой тонны которого после обработки в биогазовых установках можно получать от 10 до 20 м³ биогаза с теплотворной способностью 5600–6300 ккал/м³.

Объемы различных видов навоза и навозных стоков на фермах России, которые могут быть использованы для производства биогаза, составляют 408,5 млн т в год с общим содержанием сухих веществ 34,6 млн т, энергетический потенциал этого навоза – 6025 млн м³ биогаза в год, а его использование для технологических нужд ферм обеспечит экономию 4,3 млн т жидкого условного топлива [2].

Общий потенциал рынка биогаза, а также электро- и теплогенерации на базе биогазовых комплексов, использующих отходы аграрной промышленности, составляет в Российской Федерации более \$18,4 млрд. При этом производство биогаза может достичь 14,7 млрд м³ в год, что является эквивалентом 10 млрд м³ природного газа [3]. В Европе и Китае биогаз потенциально может заменить до 25% потребления природного газа [4]. Потенциал получения биогаза из сельскохозяйственных отходов Китая составляет 340 млрд м³ [5]. Наибольший выход биогаза наблюдается при переработке свиного навоза – 3,6–4,8 м³/кг сухого вещества, а также коровьего навоза. Это объясняется присутствием метаногенных бактерий в желудках скота [6]. Схема блока производства электроэнергии из биогаза с удалением сероводорода представлена в работе [7]. Использование гибридных генераторов позволяет еще больше повысить энергоэффективность [8]. В развивающихся странах около 3 млрд чел. используют дрова, жмых, навоз и уголь в качестве источника энергии. Прямое сжигание такого сырья



влечет выделение значительного количества угарного газа, углеводородов и твердых частиц. Внедрение биогаза как экологически чистого топлива будет способствовать сохранению здоровья населения, а также позволит сократить массовую вырубку лесов на дрова в развивающихся странах [9].

Подсчитано, что годовая потребность в биогазе для обогрева жилого дома составляет около 45 м^3 на 1 м^2 жилой площади, суточное потребление при подогреве воды для 100 голов крупного рогатого скота – $5\text{--}6 \text{ м}^3$. Потребление биогаза при сушке сена (1 т) влажностью 40% равно 100 м^3 , 1 т зерна – 15 м^3 , для получения $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии – $0,7\text{--}0,8 \text{ м}^3$ [10].

Методы

На базе составленной модели для совместного осуществления процессов биогазовой и вермитехнологии [11] проведены расчеты и анализ возможности снижения потребления органического топлива для производства электроэнергии с помощью теплосиловых установок.

Результаты и обсуждение

В условиях неравномерных графиков потребления электроэнергии коэффициент полезного действия (КПД) электростанций изменяется, причем максимальные значения достигаются в номинальных или близких к номинальным режимам. Это характерно и для синхронных генераторов. При снижении электрической нагрузки возрастает расход топлива на $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ выработанной из органического топлива энергии.

Иными словами, удельная стоимость выработки $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ может существенно меняться от формы графика электрической нагрузки. В условиях предприятий, находящихся в удаленных районах и не обладающих подключением к централизованным линиям электропередач, задача регулирования электропотребления становится еще более актуальной в связи с большей неравномерностью графика отдельного предприятия по сравнению с группой потребителей [12].

Рассмотрим потребление электроэнергии промышленным предприятием от одного энергоблока и рассмотрим кривую КПД газотурбинной установки, входящей в его состав (рис. 1).

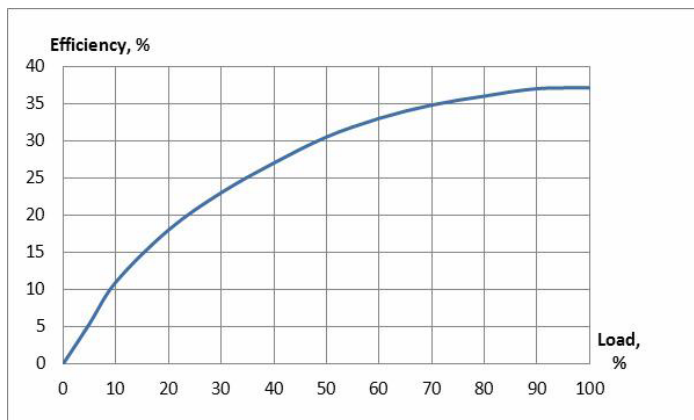


Рис. 1. График зависимости КПД газотурбинной установки от нагрузки

Из графика видно, что КПД достигает максимальных значений при номинальной нагрузке, а в режимах, отличных от номинального, КПД падает. Это, в свою очередь, приводит к повышенным затратам органического топлива. Рассмотрим пример суточного графика нагрузки предприятия, на котором представлены значения активной мощности (P , MW) за период T , равный одному часу. Интервалы осреднения примем равными получасу (рис. 2).

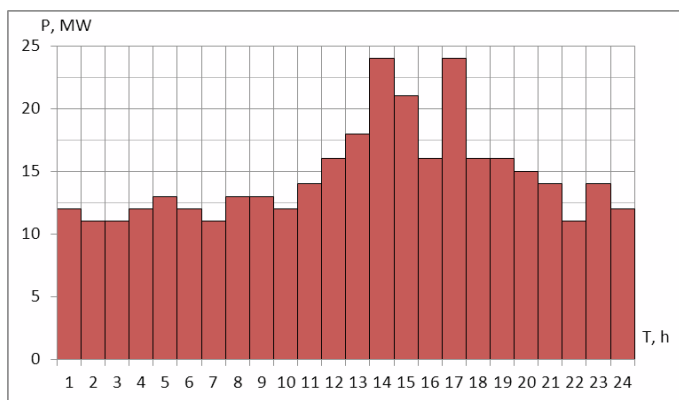


Рис. 2. Суточный график потребления электрической энергии

Видно, что график нагрузки имеет пиковое потребление электроэнергии в 14 и 17 ч. Выравнивание такого графика дает наиважнейший с точки зрения энергосистемы эффект. Он позволяет увеличить коэффициент использования



установленной мощности электростанций, при этом уменьшается время простоя генерирующих мощностей и снижается удельное потребление топлива. Следует отметить, что при регулировании графика нагрузки функция затрат на электроэнергию должна стремиться к минимуму.

$$\sum_{i=1}^n (C1iD1i + W2iC2i) \rightarrow \min$$

где $C1i$ – цена единицы заявленной мощности в i периоде; $D1i$ – заявленная в i периоде мощность; $C2i$ – цена потребленной в i периоде мощности; $W2i$ – потребленная в i периоде энергия.

Далее рассмотрим график КПД производства электрической энергии из органического топлива при заданном графике нагрузки (рис. 3).

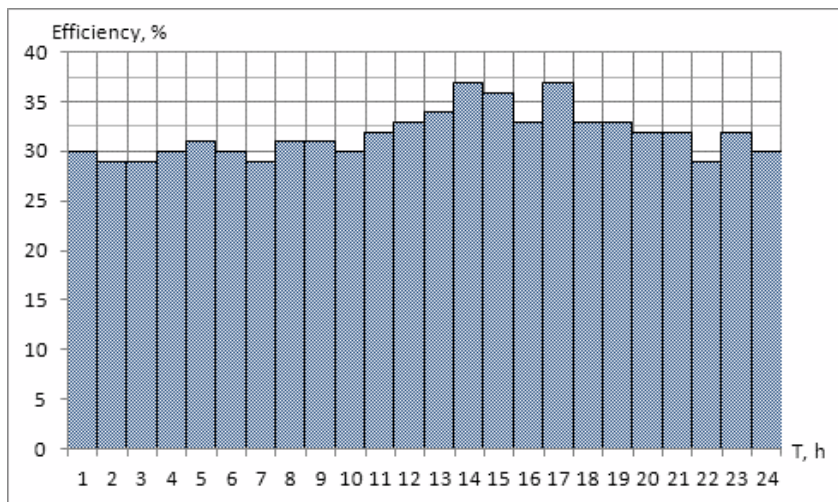


Рис. 3. Суточный график КПД производства электрической энергии

За 100% нагрузку примем 24 МВт. Средний КПД выработки электроэнергии из органического топлива в данном случае составит 32,4%.

Известны методы регулирования графиков нагрузки, которые направлены на регулирование нагрузки предприятия с учетом возможного применения накопителей энергии [13–15]. Рассмотрим график нагрузки после его выравнивания при условии применения накопителя электроэнергии (рис. 4).

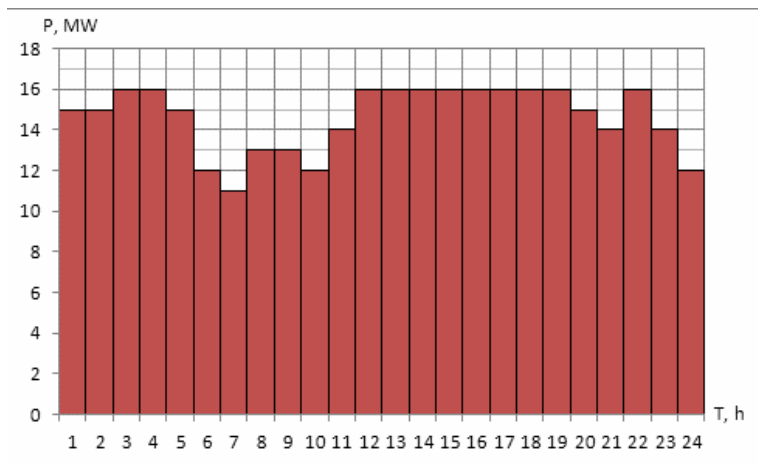


Рис. 4. Суточный график потребления электрической энергии после выравнивания

Суточный график КПД производства электрической энергии после выравнивания электропотребления представлен на рис. 5.

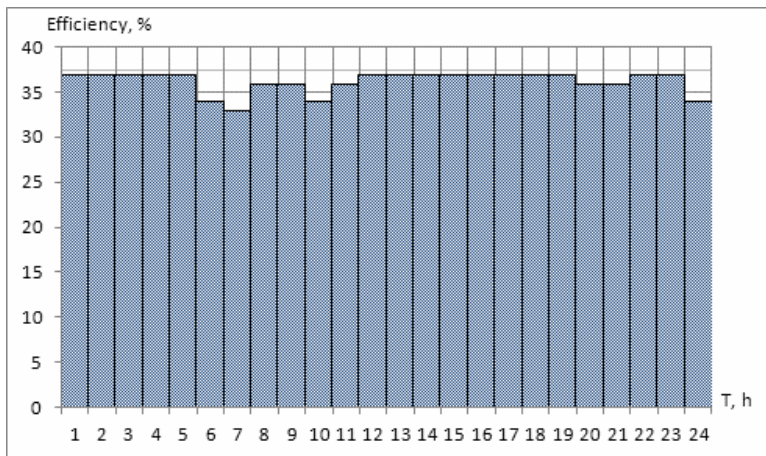


Рис. 5. Суточный график КПД производства электрической энергии после выравнивания электропотребления

За 100% нагрузку примем 16 МВт и не будем учитывать изменение кривой КПД в связи с выбором машины меньшей мощности. Средний КПД выработки электроэнергии из органического топлива в данном случае составит 36,4%.



Выводы

Биоэнергетика – один из перспективных видов возобновляемых источников энергии России, ее ресурс – более 140 млн т.у.т. в год. Выработка энергии биогазовым методом позволит также значительно снизить нагрузку на окружающую среду путем полной утилизации промышленных и сельскохозяйственных отходов. В результате проведенных расчетов снижения расхода органического топлива при выработке электроэнергии, при применении метода выравнивания нагрузки выявлено, что средний КПД выработки электроэнергии при выравнивании графика нагрузки в абсолютном выражении вырос на 4% и в относительном на 12,3%. Иными словами, из одной тонны органического топлива в данном случае можно получить на 12,3% больше электрической энергии. Таким образом, появляется возможность дополнительно подключать до 8 МВт нагрузки без установки дополнительных генерирующих мощностей. Также это позволит сократить потери электроэнергии в сетях.

Литература

1. (2013). Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».
2. Катмаков, П. С., Бушов, А. В., Гавриленко, В. П. (2008). *Биотехнология в животноводстве*. Ульяновск: ГСХА, 154 с.
3. Лукьянов, А. Н. (2013). Альтернативная энергия России – биогаз. *Агробизнес: экономика – оборудование – технологии*, № 10, С. 60–69.
4. Guo, M., Song, W., Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 712–725.
5. Zhang, T., Yang, Y., Xie, D. (2015). Insights into the production potential and trends of China's rural biogas. *International Journal of Energy Research*, vol. 39, is. 8, pp. 1068–1082.
6. Bond, T., Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, is. 4, pp. 347–354.
7. Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., Vitidsant, T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. *Applied Energy*, vol. 86, is. 5, pp. 669–674.
8. Moulod, M., Jalali, A., Asmatulu, R. (2016). Biogas derived from municipal solid waste to generate electrical power through solid oxide fuel cells. *International Journal of Energy Research*, 40

(15), pp. 2091–2104.

9. Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 846–859.

10. Шомин, А. А. (2002). *Биогаз на сельском подворье*. Балаклея: Информационно-издательская компания «Балаклійщина», 68 с.

11. Ковшов, С. В., Скамын, А. Н. (2017). Перспективная методика получения биогаза и биогумуса. Экспериментальный стенд. *Вода и экология: проблемы и решения*, №1, С. 54–62.

12. Колесник, Ю. Н., Веньгин, К. А. (2006). Повышение эффективности управления генераторами электроэнергии потребителей в рыночных условиях функционирования. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*, №2 (25), С. 60–65.

13. Астахов, Ю. Н. (1983). Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах. *Электричество*, № 4, С. 1–7.

14. Хронусов, Г. С. (1998). *Формирование эффективных режимов электропотребления промышленных предприятий*. Екатеринбург: УГГТА, 340 с.

15. Скамын, А. Н., Брагин, А. А. (2012). Регулирование режимами электропотребления. В сб.: *Материалы IV Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании»*, Брянск: Издательство БГТУ, С. 99–100.

References

1. (2013). Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28 maya 2013 g. № 449 «O mekhanizme stimulirovaniya ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii na optovom rynke ehlektricheskoy ehnergii i moshchnosti» [The RF Government resolution of May 28, 2013 №449 “About the mechanism of stimulation of using renewable energy sources in the wholesale market of electric energy and power”] (in Russian).

2. Katmakov, P. S., Bushov, A. V., Gavrilenko V. P. (2008). *Biotekhnologiya v zhivotnovodstve* [Biotechnology in livestock farming]. Ul'yanovsk: GSKHA, 154 p. (in Russian).

3. Luk'yanov, A. N. (2013). Al'ternativnaya ehnergiya Rossii – biogaz. [Alternative energy of Russia is biogas]. *Agrobiznes: ehkonomika – oborudovanie – tekhnologii*, № 10, pp. 60–69 (in Russian).

4. Guo, M., Song, W., Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 712–725.

5. Zhang, T., Yang, Y., Xie, D. (2015). Insights into the production potential and trends of China's rural biogas. *International Journal of Energy Research*, vol. 39, is. 8, pp. 1068–1082.

6. Bond, T., Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, is. 4, pp. 347–354.



7. Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., Vitidsant, T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. *Applied Energy*, vol. 86, is. 5, pp. 669–674.
8. Moulod, M., Jalali, A., Asmatulu, R. (2016). Biogas derived from municipal solid waste to generate electrical power through solid oxide fuel cells. *International Journal of Energy Research*, 40 (15), pp. 2091–2104.
9. Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, p. 846–859.
10. Shomin, A. A. (2002). *Biogaz na sel'skom podvor'e* [Biogas on a farmstead]. Balakleya: Informacionno-izdatel'skaya kompaniya «Balaklijshchina», 68 p. (in Russian).
11. Kovshov, S. V., Skam'in, A. N. (2017). Perspektivnaya metodika polucheniya biogaza i biogumusa. Eksperimental'nyj stand [Promising methods of obtaining of biogas and vermicompost. Experimental stand]. *Water and Ecology*, №1, pp. 54–62 (in Russian).
12. Kolesnik, Yu. N., Ven'gin, K. A. (2006). Povyshenie ehffektivnosti upravleniya generatorami ehlektroehnergii potrebitelej v rynochnyh usloviyah funkcionirovaniya. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Suhogo*, № 2 (25), pp. 60–65 (in Russian).
13. Astahov, Yu. N. (1983). Funkcional'nye vozmozhnosti nakopitelej ehlektricheskoy ehnergii v ehnergosistemah [The functionality of the electric energy storages in power systems]. *Elektrichestvo*, № 4, pp. 1–7 (in Russian).
14. Hronusov, G. S. (1998). *Formirovanie ehffektivnyh rezhimov ehlektropotrebleniya promyshlennyh predpriyatij* [The formation of efficient modes of energy consumption at industrial enterprises]. Ekaterinburg: UGGGA, 340 p. (in Russian).
15. Skam'in, A. N., Bragin, A. A. (2012). Regulirovanie rezhimami ehlektropotrebleniya [Control by the power consumption modes] V sb.: *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Dostizheniya molodyh uchenyh v razvitii innovacionnyh processov v ehkonomike, nauke, obrazovanii»*, Bryansk: Izdatel'stvo BGTU, pp. 99–100 (in Russian).