

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 665.765:621.771.014.2

Вячеслав Викторович Бухмиров

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Алексей Викторович Садчиков

ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики, Россия Оренбург.

Алексей Алексеевич Садчиков

ФГБОУВО «Оренбургский государственный университет», студент, Россия, Оренбург, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Елена Николаевна Темлянцева

ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Евгений Николаевич Бушуев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Разработка горелочного устройства для эффективного сжигания биогаза

Авторское резюме

Состояние вопроса. Потребность в энергоресурсах в современном металлургическом производстве практически полностью покрывается газообразным топливом. Альтернативным и более дешевым видом топлива является биогаз, получаемый в процессе переработки органических отходов. Опыт его использования показал, что в большинстве современных горелочных устройств происходит снижение КПД и наблюдается ограничение диапазона регулирования нагрузки. Для применения биогаза в промышленных условиях необходима разработка горелочных устройств и способов его сжигания, обеспечивающих большую полноту сгорания, а также более высокую эффективность преобразования энергии.

Материалы и методы. Использованы результаты газового анализа биогаза, полученного в процессе анаэробного разложения органических отходов в реакторах биоэнергетической станции. Для оценки показателей энергетической эффективности газовой горелки использованы методы математической статистики с применением регрессионного анализа экспериментальных данных.

Результаты. Экспериментально доказана возможность использования биогаза и свалочного газа в процессах обжига, доменной плавки, производства проката и стали, а также термической обработки металла. Описаны свойства и состав биогаза на выходе из реактора метаногенеза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро». Предложена новая конструкция газовой горелки, в которой благодаря эф-

фекту вращения перфорированных трубопроводов газоподводящих каналов значительно (до 32 %) повышается эффективность смесеобразования и полнота сгорания потока метаносодержащей газовой смеси. На основе результатов выполненного промышленного эксперимента определены оптимальные значения скорости подачи газовой смеси, температуры подаваемого воздуха, объемной доли метана в целях получения наибольшей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа.

Выводы. Применение предложенной конструкции газовой горелки позволит энергетически эффективно сжигать биогаз в металлургических печах, печах обжига и сушилках, а также в любых паровых и водогрейных котлах.

Ключевые слова: биогаз, биоэнергетическая станция, газоздушная смесь, горелочное устройство, сжигание газовых смесей, энергосбережение

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Alexey Viktorovich Sadchikov

Orenburg State University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associative Professor of Electric and Heat Power Engineering Department, Russia, Orenburg.

Alexey Alekseevich Sadchikov

Orenburg State University, student, Russia, Orenburg, e-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Elena Nikolaevna Temlyantseva

Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associative Professor of Heat Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Evgeny Nikolaevich Bushuev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of technical Sciences, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Burner development for efficient combustion of biogas

Abstract

Background. Now in metallurgical production energy resources demand is almost completely satisfied by gaseous fuel. Biogas obtained during organic waste processing is considered as an alternative and cheaper type of fuel. The experience of biogas application has shown that in most modern burners decrease of efficiency and limitation of the range of load regulation is observed. To apply biogas in an industrial environment, it is necessary to develop burners and the methods of its combustion, which provide a high combustion efficiency, as well as a higher energy conversion efficiency.

Materials and methods. The authors have used the results of gas analysis of biogas obtained in the process of anaerobic decomposition process of organic waste in the reactors of a bioenergy plant. Methods of mathematical statistics with the use of regression analysis of experimental data were used to assess the indicators of the energy efficiency of the gas burner.

Results. The possibility of using biogas and landfill gas in the process of roasting, blast-furnace smelting, production of rolled products and steel, as well as heat treatment of metal has been experimentally proven.

The properties and composition of biogas at the outlet of the methanogenesis reactor of the bioenergy plant "EcoVoltAgro" are described. A new design of a gas burner is proposed. In this model the efficiency of mixture formation and the completeness of combustion of the flow of a methane-containing gas mixture are significantly increased (up to 32 %) due to the effect of rotation of the perforated pipelines of the gas inlet pipe. On the basis of the results of the full-scale experiment, the optimal values of the gas-air mixture supply rate, the temperature of the supplied air, the volume fraction of methane were determined in order to obtain the largest width of the zone of deviations of the permissible concentrations of carbon dioxide.

Conclusions. The use of the designed gas burner provides energy-efficient combustion of biogas in metallurgical furnaces, kilns, and dryers, as well as in any steam and hot water boilers.

Key words: biogas, bioenergy plant, gas-air mixture, burner, combustion of gas mixtures, energy saving

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.005-013

Введение. История такой отрасли российской промышленности, как черная металлургия, тесно связана с историей развития топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Последние два десятилетия отмечены устойчивым ростом доли газообразного топлива в потреблении энергоресурсов на основные нужды технологических процессов.

В настоящее время тенденция роста доли потребления природного газа предприятиями черной металлургии обусловлена уменьшением объемов поставок коксующихся углей, общим снижением производительности коксовых батарей и доменных печей, а также значительным уменьшением потребления доменного и коксового газов в общем объеме энергоресурсов, потребляемых в процессах и технологиях черной металлургии.

Если не учитывать расход металлургического кокса в технологических целях, то вся потребность в энергоресурсах на современном металлургическом производстве практически полностью покрывается газообразным топливом. В редких случаях в качестве резервного топлива используется мазут, а в районах, удаленных от систем распределения природного газа, для покрытия дефицита все чаще используется сжиженный газ. Среднестатистическая структура топливного баланса современного металлургического производства включает в себя 85 % газообразного топлива, 10 % твердого и 5 % жидкого топлива².

С другой стороны, конкурентоспособность продукции черной металлургии в современных рыночных условиях зависит в первую очередь от ее энергоемкости, при этом неуклонный рост цен на природный газ негативно сказывается на всех аспектах металлургического производства.

В связи с этим использование альтернативных, более дешевых видов газообразного топлива, а также повышение качества процесса сжигания газообразного топлива в технологических процессах черной металлургии является актуальным научным направлением.

² Использование газов в черной металлургии: Газоснабжение металлургического завода. – Металлургический портал MetalSpace. – Режим доступа: http://metallicheskiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/gazosnabzhenie_metallyrgicheskogo_zavoda1

Рост потребляемого газообразного топлива спровоцировал значительное увеличение парка эксплуатируемых газогорелочных устройств, в настоящее время в черной металлургии используется свыше 52000. Из них наибольшая доля (свыше 46 %) приходится на метизное производство, около 40 % используется в производстве проката и стали. При этом годовой объем производимых в России промышленных газовых горелок не превышает 10000, тогда как фактическая потребность в черной металлургии возросла до 11000–14000 в год.

Так, в 2012 году доля черной металлургии в ВВП страны составляла около 1,4 %, в промышленном производстве – около 8 %, в экспорте – 6 %. Как потребитель продукции и услуг субъектов естественных монополий, черная металлургия использует 5,3 % электроэнергии, более 8 % природного газа от общего внутреннего потребления в России³. В настоящее время доля потребления газообразного топлива значительно возросла. Например, по сведениям портала металлургической базы России⁴, в 2018 году более 82 % эксплуатируемых в черной металлургии газовых горелок использовали природный газ как основное топливо. Действительно, газообразное топливо, природный газ, продукты конверсии природного газа (в особенности водород) являются эффективным сырьем, используемым в процессах активного восстановления железа из окатышей⁵.

В качестве альтернативного варианта газогорелочных устройств ниже рассматриваются горелки, используемые для сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном изменения объемной доли метана, таких как биогаз, получаемый в процессе переработки органических отходов [1, 2].

³ Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года».

⁴ Уральская, Центральная и Сибирская Металлургические базы России. Режим доступа: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/metallurgicheskaya-baza.html>

⁵ Производство железа: особенности выплавки и добычи сырья. Режим доступа: <http://stroyres.net/metallicheskie/vidyi/chyornyye/zhelezo/proizvodstvo-vyipivki.html>

Эффективность работы газогорелочных устройств, сжигающих биогаз и свалочный газ, зависит, прежде всего, от состава газа и его энергетических характеристик, а также от организации процесса сжигания биогаза и конструкции горелочного устройства.

Проблема использования биогаза в технологических процессах черной металлургии, связанная с их компонентным составом, может быть решена благодаря совместной реализации следующих направлений:

- повышение эффективности систем очистки и разделения метаносодержащих газовых смесей [3–16];

- повышение эффективности устройств и способов сжигания биогаза [17–19].

Методы исследования. Биогаз, получаемый в процессе анаэробного разложения органических отходов, представляет собой газовую смесь с высоким содержанием метана. Теплотворная способность биогаза определяется в основном величиной объемной доли CH_4 . На выходе из реактора биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» (ООО «КомплеСУ», г. Оренбург) в составе биогаза присутствуют балластные примеси, наличие которых может оказывать негативное влияние как на сам процесс сжигания, так и на работу энергосилового оборудования [1]. Присутствие сероводорода даже в небольших количествах может привести к существенному сокращению срока службы трубопроводов, компрессора, запорно-регулирующей арматуры, газопоршневого генератора, котла. Сероводород относится к агрессивным примесям, так как при взаимодействии с водой способен образовывать серную кислоту. По этой причине непосредственно после реактора биогаз очищается от влаги, сероводорода и меркаптановой серы с помощью оксида железа и специального фильтра-осушителя. Часть серы также кристаллизуется в процессе сбраживания в реакторе и камере гомогенизации за счет добавления в загрузочное сырье хлорида железа в небольших количествах (не более 500 грамм на 2 тонны загружаемого субстрата 1 раз в 10 дней). После проведения указанных мероприятий биогаз имеет в составе два основных макрокомпонента – метан и углекислый газ, объемное соотношение которых колеблется в зависимости от времени года и состава загрузочного

сырья. Азот присутствует в ничтожно малом количестве.

Состав биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» изменяется в течение года в зависимости от технологического графика рециклинга отходов, природных климатических условий, а также от термобарических условий режимов ферментации и ряда факторов, имеющих ярко выраженный вероятностный характер изменения. В настоящее время ООО «КомплеСУ» перерабатывает и утилизирует 47 видов различных отходов, в том числе с содержанием органики. В процессах анаэробной переработки используются некачественные продукты питания, отходы убойного производства, включая продукты переработки технических фабрикатов убойного производства, навоз крупного рогатого скота, санкционные продукты, птичий помет.

Каждому виду отходов соответствует определенный график поступления, в связи с чем периодически происходит изменение компонентного состава загружаемого субстрата (инфлюента). При этом периодически изменяется компонентный состав получаемого биогаза. Происходят изменения соотношения объемных долей основных макрокомпонентов биогаза – метана A_{CH_4} и углекислого газа A_{CO_2} [16].

Пример динамики изменения среднесуточного значения объемной доли метана биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» в течение сентября 2018 года после отделения сероводорода и влаги представлен на рис. 1.

Анализ этих данных показывает, что объемная доля метана в биогазе в течение года изменяется в пределах от 61,8 до 86,4 %, среднегодовое значение A_{CH_4} составляет 72,17 % от общего объема. Это значение отвечает требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения» и вполне достаточно для дальнейшего использования биогаза в качестве основного топлива в процессах обжига, доменной плавки, производства проката и стали, термической обработки металла. С другой стороны, наличие углекислого газа в составе биогаза вызывает осложнение процесса сжигания, при этом возникают проблемы, касающиеся пропорциональной подачи сжигаемой смеси воздуха и биогаза.

Сентябрь 2018

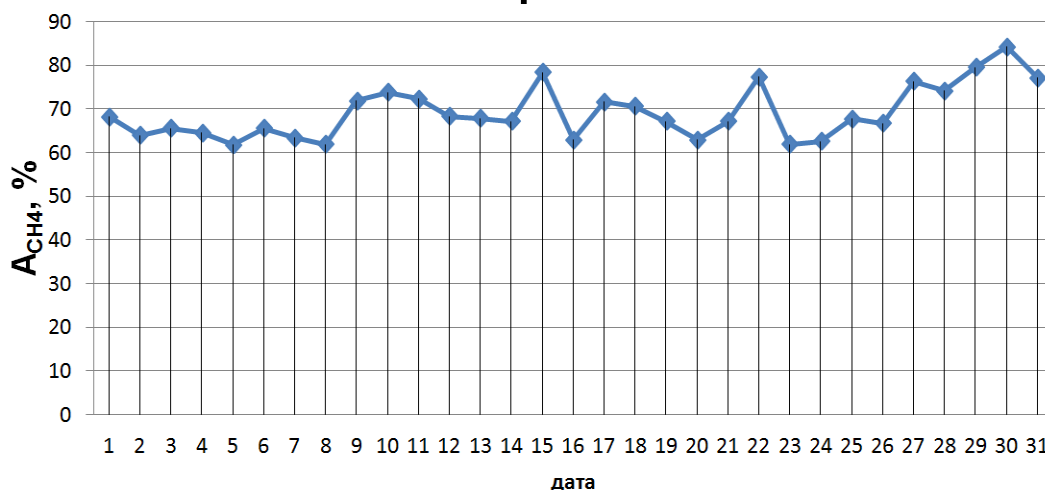


Рис. 1. Динамика изменения среднесуточного значения объемной доли метана биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» в сентябре 2018 г.

Предлагаемые технические решения. При использовании биогаза в качестве топлива в большинстве современных горелочных устройств происходит снижение КПД и ограничение диапазона регулирования нагрузки.

Для повышения эффективности сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном изменения объемной доли метана, в том числе биогаза, предложено горелочное устройство [19], конструкция которого показана на рис. 2. Газовая горелка содержит паропровод 1, механиче-

ский привод 2, редуктор 3, пластинчатый теплообменный аппарат 4, корпус горелки 5, внутри которого расположены внешний 6 и внутренний 7 газоподводящие каналы, выход каждого из которых соединен с группой сопел 9 и 10, воздухоподводящий канал 11, подшипники скольжения 12, механические передаточные ремни (цепи) 13, конденсатоотводчик 14. Сопла 9 и 10 направлены в противоположные стороны, причем внешний 6 и внутренний 7 газоподводящие каналы выполнены с перфорацией 8 и при работе горелки вращаются навстречу друг другу.

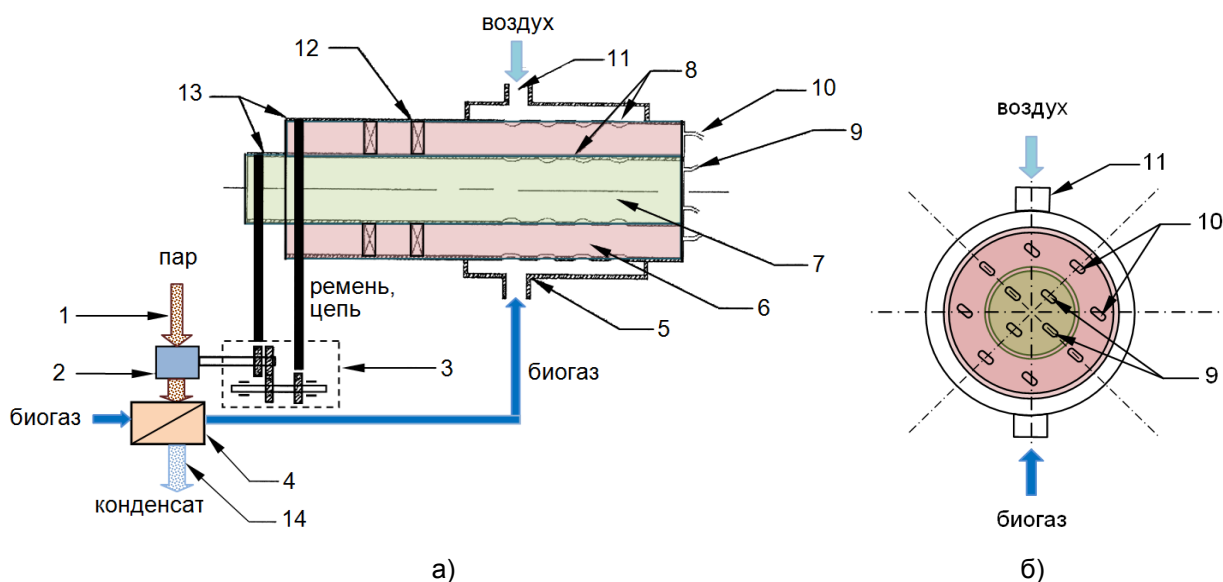
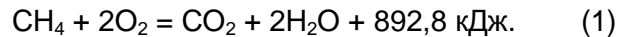


Рис. 2. Конструкция газовой горелки: а – общий вид; б – профильный вид; 1 – паропровод; 2 – механический привод; 3 – редуктор; 4 – пластинчатый теплообменный аппарат; 5 – корпус горелки; 6 – внешний газоподводящий канал; 7 – внутренний газоподводящий канал; 8 – перфорация; 9, 10 – сопла; 11 – воздухоподводящий канал; 12 – подшипники скольжения; 13 – механические передаточные ремни (цепи); 14 – конденсатоотводчик

Работа газовой горелки осуществляется следующим образом: часть котлового пара подается через паропровод 1 в механический привод 2. При этом начинает вращаться цилиндрический редуктор 3, крутящий момент посредством механических передаточных ремней (цепей) 13 передается внутреннему 7 и внешнему 6 газоподводящим каналам через подшипники скольжения 12. Из турбины 2 пар попадает в пластинчатый парогазовый теплообменный аппарат 4, конденсируется в нем и затем удаляется через конденсатоотводчик 14. Биогаз подается в теплообменник 4 с начальными значениями температуры T_1 и давления P_1 , нагревается и расширяется в нем, при этом температура и давление биогаза после теплообменника изменяются до значений T_2 и P_2 , затем нагретый биогаз попадает в корпус 5 и через перфорацию 8 распределяется во внешнем 6 и внутреннем 7 газоподводящих каналах. Встречное вращение перфорированных трубопроводов внешнего и внутреннего газоподводящих каналов обуславливает высокую интенсивность смешения воздуха и биогаза, при этом устанавливается турбулентный режим течения газовой смеси. Полученная смесь воздуха и биогаза поступает в сопла 9 и 10, направленные противоположно друг другу. Конструкция горелки позволяет регулировать количество подаваемого воздуха через воздухоподводящий канал 11. Благодаря эффекту вращения перфорированных трубопроводов газоподводящих каналов повышается качество смесеобразования и, как следствие, полнота сгорания потока метаносодержащей газовой смеси [19]. Тепловое расширение подаваемого биогаза в парогазовом теплообменнике обеспечивает значительное увеличение интенсивности турбулизации потока газовой смеси при ее сжигании. При этом повышаются экономичность и КПД горелки, в особенности при использовании в качестве топлива газовых смесей с низким содержанием метана.

Результаты исследования. Для оценки показателей энергетической эффективности газовой горелки предложенной конструкции проведены статистические исследования математической модели процесса на примере сжигания биогаза биоэнергетической станции «ЭкоВольтАгро» с динамическим диапазоном изменения объемной доли метана от 62 до 86 %.

В качестве входных параметров в исследованиях использовались характеристики исходной газовой смеси, теплотворная способность топлива, скорость подачи топлива, температура воздуха, коэффициент избытка воздуха α ; в качестве выходных параметров были определены КПД горелки η и удельный расход топлива на 1 ГДж производимой теплоты b_T . Термохимическая реакция горения метана при сжигании 1 моль метана описывается уравнением



Задачей многофакторного эксперимента было установление зависимостей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2 (%), удельных затрат условного топлива на вырабатываемое тепло $b_{\text{ут}}$ (кг.у.т./Гкал) и коэффициента полноты сгорания топлива $k_{\text{ср}}$ (%) от скорости подачи биогаза ($10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), температуры подаваемого воздуха ($^{\circ}\text{C}$), объемной доли метана (%). Регрессионная модель, описывающая процесс сжигания биогаза в исследуемой горелке, включает следующие уравнения:

– для ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2 (%):

$$y_1 = 49,3 + 1,8x_1 + 1,4x_3 + 2,6x_{12} + 8,4x_{22} + 3,8x_{32}; \quad (2)$$

– удельных затрат условного топлива на вырабатываемое тепло $b_{\text{ут}}$ (кг.у.т./МДж):

$$y_2 = 29,3 - 0,012x_2 - 0,037x_3 + 0,011x_1x_3 + 0,540x_{12} + 0,139x_{22} + 0,321x_{32}; \quad (3)$$

– коэффициента полноты сгорания топлива $k_{\text{ср}}$ (%):

$$y_3 = 227,4 + 22,7x_1 + 19,4x_2 + 42,5x_3 - 11,7x_1x_2 - 62,3x_{12} - 29,3x_{22} + 44,1x_{32}, \quad (4)$$

где x_1 – безразмерная скорость подачи биогаза; x_2 – безразмерная температура воздуха; x_3 – безразмерная объемная доля метана; x_1, x_2, x_3 представлены в условных единицах.

Для перевода в условные единицы нужно воспользоваться следующими уравнениями:

$$x_1 = (V_6 - 0,05)/0,02; \quad (5)$$

$$x_2 = (t_b - 70)/50; \quad (6)$$

$$x_3 = (A_{\text{CH}_4} - 70)/10, \quad (7)$$

где V_6 – скорость подачи газозвушной смеси, $\text{дм}^3/\text{с}$; t_b – температура воздуха, $^\circ\text{C}$; A_{CH_4} – объемная доля метана, %.

По результатам математического моделирования установлены оптимальные пределы значений скорости подачи газозвушной смеси, температуры подаваемого воздуха, объемной доли метана в целях получения наибольшей ширины зоны отклонений допустимых концентраций углекислого газа ΔCO_2 .

Так, при содержании метана в биогазе 62 % оптимальными являются скорость подачи воздуха от -1 до $0,4$ у.е. (от $0,03$ до $0,048 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и температура воздуха от $-0,5$ до $+0,5$ у.е. (от 45 до 95 $^\circ\text{C}$). При возрастании объемной доли метана в биогазе до 86 % изменяются оптимальные значения скорости подачи от -1 до $0,4$ у.е. (от $0,03$ до $0,048 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и температура воздуха от $-0,6$ до $+0,6$ у.е. (от 40 до 100 $^\circ\text{C}$). При этом значение коэффициента полноты сгорания топлива $k_{\text{ср}}$ возрастает на величину от 27 (для $A_{\text{CH}_4} = 67$ %) до 32 % (для $A_{\text{CH}_4} = 86$ %).

Таким образом, сравнение предложенной конструкции с аналогичными показывает лучшее сгорание смеси газа и воздуха, а также более высокую эффективность преобразования энергии и эксплуатационную надежность, поскольку газовая горелка такой конструкции не требует регулирования положения сопел в соответствии с углом потока газа или изменением формы сопла выхода. Предлагаемая горелка может быть предназначена для высокоэкономичного и экологически чистого сжигания метаносодержащих газовых смесей с широким диапазоном объемной доли метана, в том числе природного газа, пропан-бутановой смеси, технологических газов различных производств, синтетических, биологических, коксо доменных и других газов. Оригинальный способ сжигания топлива позволяет регулировать длину факела, сохраняя оптимальные эксплуатационные свойства во всем диапазоне регулирования с максимальной объемной интенсивностью, обеспечивает высокую устойчивость горения в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха, равномерное температурное поле в топке (камере сгорания) и высокие экологические и технико-экономические показатели.

Проблема, возникающая во время эксплуатации традиционных горелок распространенного в черной металлургии типа ГТН, ГНП или аналогичных, сводится к необходимости адаптации промышленных типов горелок к сжиганию обедненных газовых смесей, например таких, как биогаз, путем уменьшения подачи воздуха, поскольку для полного сгорания 1 м^3 биогаза необходимо приблизительно 6 м^3 воздуха, в то время как 1 м^3 бутана требует чуть более 30 м^3 воздуха, а один 1 м^3 пропана требует почти 24 м^3 воздуха.

Предлагаемая конструкция горелки может применяться на любых паровых и водогрейных котлах (ДКВР, Е, ДЕ, КЕ, ГМ, БГМ, КВГМ, ПТВМ, ВК, КБНГ, КВГ, ТВГ, НИИСТУ, Факел, Радиант, Инвеста и др.), в металлургических печах, печах обжига, сушилах (ДСП, ЖСК и др.) и т.п. Номинальная тепловая мощность горелок данного типа может варьироваться в пределах от $0,3$ до $35,0$ МВт.

Выводы. Сравнение предложенной конструкции газовой горелки с аналогичными показывает значительное улучшение (до 32 %) коэффициента полноты сгорания газозвушной смеси, а также более высокую эффективность преобразования энергии и эксплуатационную надежность, поскольку газовая горелка такой конструкции не требует регулирования положения сопел в соответствии с углом потока газа или изменением формы выходного сопла.

Список литературы

1. Бухмиров В.В., Кокарев Н.Ф., Садчиков А.В. Биоэнергетическая станция «Эко-ВольтаАгро» для переработки органических отходов // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 1(18). – С. 60–69.
2. Обеспечение энергетической независимости и улучшение экологической безопасности полигонов ТКО / А.В. Садчиков, В.Ю. Соколов Н.Ф. Кокарев, С.А. Наумов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2016. – № 15–18(203–206). – С. 104–111.
3. Bukhmirov V.V., Sadchikov A.V., Kokarev N.F. Installation of separation of methane-containing gas mixtures of the bioenergy station «Eco-Volt-Agro» // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1111. – 2018. 012058 IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1111/1/012058. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/nsearch?terms=Sadchikov>

4. **Тиракьян А.С., Макаренко С.Ф., Костров Ю.А.** Разделение газовых смесей с помощью мембран из полых волокон // *Химволокно*. – 1988. – С. 26.

5. **Mehrotra A., Ebner A.D., Ritter J.A.** Arithmetic approach for complex PSA cycle scheduling // *Adsorption*. – 2010. – Vol. 16, No. 3. – P. 113–126.

6. **Agarwal A., Biegler L.T., Zitney S.E.** A superstructure-based optimal synthesis of PSA cycles for post-combustion CO₂ capture // *AIChE Journal*. – 2010. – Vol. 56, No. 7. – P. 1813–1828.

7. **Betlem B.H.L., Gotink R.W.M., Bosch H.** Optimal operation of rapid pressure swing adsorption with slop recycling // *Computers and Chemical Engineering*. – 1998. – Vol. 22. – Supplement 1. – P. S633–S636.

8. **Шумяцкий Ю.И.** Промышленные адсорбционные процессы. – М.: Колосс, 2009. – 183 с.

9. **Семавин Р.А.** Разделение и очистка метаносодержащих газовых смесей с помощью режима гидратации // *Современные тенденции развития науки и технологий*. – 2017. – № 2–2. – С. 86–88.

10. **Набиуллина А.Р., Котляр М.Н.** Очистка биогаза от примесей для применения в теплоэнергетике // *YOUNG ELPIT 2015. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сб. ст. VII Междунар. науч.-техн. конф.* – Самара, 2015. – С. 232–237.

11. **Рязанцев А.А., Глазков Д.В., Прсяников Е.Д.** Очистка биогаза от сероводорода // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2016. – № 3(38). – С. 19–24.

12. **Очистка биогаза в микробарботажной колонне** / М.А. Носырев, А.М. Трушин, Р.Б. Комляшев и др. // *Химическая промышленность сегодня*. – 2018. – № 3. – С. 32–37.

13. **Идигенов А.Б., Филатов М.И.** Установка комбинированной очистки биогаза // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 2, № 2 (71). – С. 94–101.

14. **Колтакова Ю.О.** Подготовка свалочно-го газа для утилизации на энергетических установках // *Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сб. ст. IX Междунар. науч.-практич. конф.* – Курск, 2017. – С. 129–131.

15. **Наумов С.А., Соколов В.Ю.** Факторы, влияющие на производство и очистку биогаза в технологическом процессе // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. (XX Всерос.) науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения)*. – Иваново, 2019. – С. 233–237.

16. **Bukhmirov V.V., Sadchikov A.V., Kokarev N.F.** Increase Methane Emission of Biogas Plant Using Combined Charging Raw Materials //

2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). – 2018. – P. 156–160. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8544278>

17. **Пат.** 2479790 Российская Федерация, МПК F 23 D 14/02, F 23 D 14/62. Газовая горелка / В.Ю. Соколов, С.А. Наумов, А.В. Садчиков и др.; заявл. 15.07.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.

18. **Use of ceramic injection molding technology to increase biogas burners efficiency** / V.Y. Sokolov, S.A. Naumov, A.V. Sadchikov, S.V. Mitrofanov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 127–131. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.736.1799

19. **Пат.** 2471118, МПК RU RU F23D 14/66; F23D 14/02. Газовая горелка / В.Ю. Соколов, С.А. Наумов, А.В. Садчиков и др.; заявл. 08.08.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

References

1. Bukhmirov, V.V., Kokarev, N.F., Sadchikov, A.V. Bioenergeticheskaya stantsiya «EkoVol'tAgro» dlya pererabotki organicheskikh otkhodov [Bioenergy plant “EcoVoltAgro” for organic waste processing]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2018, no. 1(18), pp. 60–69.

2. Sadchikov, A.V., Sokolov, V.Yu., Kokarev, N.F., Naumov, S.A. Obespechenie energeticheskoy nezavisimosti i uluchshenie ekologicheskoy bezopasnosti poligonov TKO [Energy power independence and improvement of ecological safety of solid municipal waste site]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya»*, 2016, no. 15–18(203–206), pp. 104–111.

3. Bukhmirov, V.V., Sadchikov, A.V., Kokarev, N.F. Installation of separation of methane-containing gas mixtures of the bioenergy station «Eco-Volt-Agro». *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1111. 2018. 012058 IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1111/1/012058. <http://iopscience.iop.org/nsearch?terms=Sadchikov>

4. Tirak'yan, A.S., Makarenko, S.F., Kostrov, Yu.A. Razdelenie gazovykh smesey s pomoshch'yu membran iz polykh volokon [Separation of gas mixtures with the membranes of hollow fibers]. *Khimvolokno*, 1988, p. 26.

5. Mehrotra, A., Ebner, A.D., Ritter, J.A. Arithmetic approach for complex PSA cycle scheduling. *Adsorption*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 113–126.

6. Agarwal, A., Biegler, L.T., Zitney, S.E. A superstructure-based optimal synthesis of PSA cycles for post-combustion CO₂ capture // *AIChE Journal*, 2010, vol. 56, no. 7, pp. 1813–1828.

7. Betlem, B.H.L., Gotink, R.W.M., Bosch, H. Optimal operation of rapid pressure swing adsorption with slop recycling. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, vol. 22, supplement 1, pp. S633–S636.

8. Shumyatskiy, Yu.I. *Promyshlennye adsorbtsionnye protsessy* [Industrial adsorptive processes]. Moscow: Koloss, 2009. 183 p.

9. Semavin, R.A. Razdelenie i ochistka metanosoderzhashchikh gazovykh smesey s pomoshch'yu rezhima gidratatsii [Separation and purification of gas mixtures by hydration mode]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*, 2017, no. 2–2, pp. 86–88.

10. Nabiullina, A.R., Kotlyar, M.N. Ochistka biogaza ot primesey dlya primeneniya v teploenergetike [Purification of biogas for application in heat power engineering]. *Sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «YOUNG ELPIT 2015. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti promyshlenno-transportnykh kompleksov»* [Ecology and safety of industrial-transportation complex: collected papers VII International scientific-technical conference]. Samara, 2015, pp. 232–237.

11. Ryazantsev, A.A., Glazkov, D.V., Prosyaniykov, E.D. Ochistka biogaza ot serovodoroda [Hydrogen sulfide stripping of biogas]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2016, no. 3(38), pp. 19–24.

12. Nosyrev, M.A., Trushin, A.M., Komlyashev, R.B., Kabanov, O.V., Kuznetsova, I.K. Ochistka biogaza v mikrobarbotazhnoy kolonne [Purification of biogas in microbubble column]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2018, no. 3, pp. 32–37.

13. Idrigenov, A.B., Filatov, M.I. Ustanovka kombinirovannoy ochistki biogaza [Installation of biogas combined treatment]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 2, no. 2(71), pp. 94–101.

14. Koltakova, Yu.O. Podgotovka svalochnogo gaza dlya utilizatsii na energeticheskikh ustanovkakh [Pretreatment of landfill gas for recycling at energy power units]. *Sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy kon-*

ferentsii «Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda» [Topical issues of ecology and labor safety: collected papers IX International scientific-practical conference]. Kursk, 2017, pp. 129–131.

15. Naumov, S.A., Sokolov, V.Yu. Faktory, vliyayushchie na proizvodstvo i ochistku biogaza v tekhnologicheskoy protsesse [Factors that influence the production and purification of biogas in technological process]. *Materialy Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Bernardosovskie chteniya)* [Current state and opportunities of development of electro- and heat technology: conference proceedings of International (XX All Russian) scientific-technical conference (Bernardoovskie readings)]. Ivanovo, 2019, pp. 233–237.

16. Bukhmirov, V.V., Sadchikov, A.V., Kokarev, N.F. Increase Methane Emission of Biogas Plant Using Combined Charging Raw Materials. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, 2018, pp. 156–160. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8544278>

17. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Goryachev, S.V., Korobkov, A.I., Lavrent'ev, A.V. *Gazovaya gorelka* [Gas-fired burner]. Patent RF, no. 2479790, 2013.

18. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Mitrofanov, S.V. Use of ceramic injection molding technology to increase biogas burners efficiency. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 127–131. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.736.1799

19. Sokolov, V.Yu., Naumov, S.A., Sadchikov, A.V., Goryachev, S.V., Lavrent'ev, A.V., Korobkov, A.I. *Gazovaya gorelka* [Gas-fired burner]. Patent RF, no. 2471118, 2012.