

УДК 662.6

**П. А. ГНИТИЁВ**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ  
СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ БИОГАЗА**

**Аннотация.** В работе проанализированы основные теплофизические характеристики искусственного топлива – биогаза. Показано, что в сравнении с природным газом степень черноты продуктов сгорания у биогаза выше на 3 %, теплоемкость выше на 2,6 %.

**Ключевые слова:** биогаз, лучистый теплообмен, степень черноты, теплообменные характеристики газов.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В последние десятилетия наметилась общемировая тенденция стремления к сокращению потребления энергетических природных ресурсов, в частности газообразного топлива – природного газа. В первую очередь это связано с конечными его запасами, с ростом стоимости добычи, транспортировки и другими факторами. Поэтому остро встает вопрос экономии природных ресурсов, а также замены на более дешевые, возобновляемые энергоносители [1].

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В промышленном секторе значительное распространение получили газы, образовавшиеся в результате работы основного оборудования, такие как доменный, коксовый, ферросплавный и другие [2]. Однако использование подобных газов рационально в пределах существующего предприятия либо на близлежащих производствах. В случае отсутствия крупного металлургического и машиностроительного производства и существующей потребности в энергетических носителях актуальным вопросом является поиск альтернативных энергетических топлив. Одним из возможных источников тепловой энергии в непромышленных районах может выступать искусственный газ – биогаз [3].

Для получения биогаза существуют различные способы и установки. В основу их работы заложено выполнение следующих основных операций [4]:

- загрузка субстрата (заранее подготовленное сырье);
- поддержание требуемой температуры внутри установки;
- отвод газов;
- выгрузка отработанного вещества.

При детальном рассмотрении технологии получения биогаза следует отметить, что основным сырьем для его производства выступают органические отходы, например от сельскохозяйственных ферм. Производственный процесс включает в себя несколько стадий:

- жиры и углеводы в результате жизнедеятельности бактерий переходят в гидролизные бактерии в период гидролизной фазы, при этом образуются аминокислоты, глюкоза и жирные кислоты;
- кислотообразующая фаза, в которой образуются ферментные бактерии, такие как органические кислоты, спирты, альдегиды, водород, диоксид углерода, аммиак и сероводород;
- ацетогенная фаза, в которой органические кислоты под действием ацетогенных бактерий преобразуются в уксусную кислоту;
- метаногинез, при протекании которого уксусная кислота разлагается на метан, воду и углекислый газ, в свою очередь, водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду.

Следует отметить, что получаемый биогаз состоит по большей части из природного газа и может быть использован в качестве его более дешевой альтернативы.

Для оценки необходимого расхода биогаза с целью замены природного газа в любом технологическом агрегате зачастую прибегают к использованию формулы расчета коэффициента замены:

$$K_{\text{зам}} = \frac{Q_{\text{н.пр.}}^p}{Q_{\text{н.зам.}}^p}$$

Однако такой расчет является очень условным и упрощенным, не дающим возможность учета особенностей теплообмена в топках энергетических агрегатов при использовании искусственных газов. В некоторой степени вопрос замены рассмотрен в работах [5, 6].

## ЦЕЛЬ

Целью данной работы является исследование характеристик продуктов сгорания биогаза, определяющих ход теплообменных процессов в технологических агрегатах.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Одной из важных характеристик теплообмена между продуктами сгорания и тепловоспринимающими поверхностями при лучистом способе передачи тепла является приведенная степень черноты системы, зависящая от степени черноты каждого из входящих в нее элементов. Поэтому при использовании альтернативных видов топлива в промышленных агрегатах важно знать степень черноты, теплоемкость продуктов сгорания заменяющих топлив.

Для исследования выбраны различные составы биогаза, характеристики которых сравниваются с природным газом. Из литературных источников известно [7], что основным компонентом биогаза является природный газ – метан ( $\text{CH}_4$ ), его концентрация варьируется в пределах 50–70 %, также большую долю занимает двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) – порядка 30–45 %, оставшуюся часть занимают примеси водорода ( $\text{H}_2$ ), азота ( $\text{N}_2$ ) и сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Перед использованием биогаза необходимо произвести его десульфурацию с целью минимизации образования окислов серы ( $\text{SO}_2$ ) и, как следствие, серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) в продуктах сгорания. Дальнейшие исследования проведены для очищенного газа.

Для сравнения выбран типичный состав природного газа (Березовское месторождение, Тюменская область, РФ) и несколько составов биогаза, согласно различным условиям его получения. Исходные составы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав исследуемых топлив

Вид газа	Содержание компонентов, %						
	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2$
Природный газ	95,1	1,1	0,3	0,1	0,4	3,0	–
Биогаз № 1	64,0	–	–	–	34,0	1,0	1,0
Биогаз № 2	52,0	–	–	–	45,0	1,5	1,5

Выполнен расчет горения топлив при сжигании газов с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 1,1$ , получены опорные результаты:

– действительное количество воздуха, необходимое для сжигания  $1 \text{ м}^3$  газа составило:

$$V_{\text{дв.пг.}} = 10,03 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{дв.№ 1}} = 6,57 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{дв.№ 2}} = 5,35 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

– суммарное количество продуктов сгорания составило:

$$V_{\text{пс.пг.}} = 11,04 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{пс.№ 1}} = 7,56 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{пс.№ 2}} = 6,35 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

– процентный состав продуктов сгорания представлен в таблице 2.

Калориметрические температуры горения газов соответственно равны  $t_{\text{кал.пг.}} = 1\,924 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кал.№ 1}} = 1\,816 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кал.№ 2}} = 1\,753 \text{ }^\circ\text{C}$ .

С целью исследования теплообменных характеристик топлив условно выбрана камера сгорания кубической формы с размерами сторон  $a = 2$  метра и степенью черноты внутренней поверхности  $\xi = 0,8$ . Камера представляет собой имитацию топки котла.

Таблица 2 – Состав продуктов сгорания для исследуемых топлив

Вид газа	Содержание компонентов, %			
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Природный газ	8,97	19,67	0,89	70,47
Биогаз № 1	12,96	18,95	0,85	67,24
Биогаз № 2	15,28	18,46	0,83	65,43

Парциальное давление двуокиси углерода в продуктах сгорания газов составляет  $P_{CO_2}^{nz} = 8,868$  кПа;  $P_{CO_2}^{№1} = 12,957$  кПа;  $P_{CO_2}^{№2} = 15,283$  кПа; водяных паров  $P_{H_2O}^{nz} = 19,667$  кПа;  $P_{H_2O}^{№1} = 19,667$  кПа;  $P_{H_2O}^{№2} = 19,667$  кПа. Исходя из размеров камеры, эффективная длина луча между поверхностями теплообмена составит  $S = 1,2$  метра. Произведение парциального давления на эффективную длину луча для CO<sub>2</sub> составит:  $P_{P.S/CO_2}^{III} = 10,762$  кПа·м;  $P_{P.S/CO_2}^{№1} = 15,549$  кПа·м;  $P_{P.S/CO_2}^{№2} = 18,34$  кПа·м; для H<sub>2</sub>O составит:  $P_{P.S/H_2O}^{nz} = 23,6$  кПа·м;  $P_{P.S/H_2O}^{№1} = 22,742$  кПа·м;  $P_{P.S/H_2O}^{№2} = 22,157$  кПа·м.

При помощи номограмм [8] определены степени черноты двуокиси углерода и водяных паров, а также поправочный коэффициент на парциальное давление для водяного пара. Составлены функции для вышеуказанных параметров, позволяющие построить график зависимости приведенной степени черноты продуктов сгорания исследуемых газов от температуры в диапазоне наибольшего влияния лучистой передачи тепла – 1 000–1 900 °С. Результаты приведены на рисунке, а. Из графиков видно, что приведенная степень черноты и теплоемкость продуктов сгорания у биогазов выше, чем у природного газа. Это связано с повышенным содержанием трехатомных газов в исходном составе биогаза, в частности CO<sub>2</sub>. С точки зрения теплопередачи излучением повышение степени черноты продуктов сгорания влечет за собой усиление теплообмена внутри камеры при прочих равных условиях.

Для исследования теплоемкости продуктов сгорания газов получены уравнения при помощи регрессионного анализа для каждого компонента в следующем виде, кДж/(м<sup>3</sup>·К):

$$\text{Для } O_2: C_{O_2} = 1,299 + 2,319 \cdot 10^{-4} \cdot t - 6,459 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 8,186 \cdot 10^{-12} \cdot t^3.$$

$$\text{Для } N_2: C_{N_2} = 1,284 + 9,133 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,916 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 7,316 \cdot 10^{-12} \cdot t^3.$$

$$\text{Для } CO_2: C_{CO_2} = 1,612 + 8,905 \cdot 10^{-4} \cdot t - 3,536 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 5,54 \cdot 10^{-11} \cdot t^3.$$

$$\text{Для } H_2O: C_{H_2O} = 1,487 + 1,911 \cdot 10^{-4} \cdot t + 6,05 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1,831 \cdot 10^{-11} \cdot t^3.$$

С учетом состава продуктов сгорания исследуемых газов построены кривые зависимости теплоемкости продуктов сгорания от температуры в диапазоне 0...1 900 °С. Результаты приведены на рисунке, б. Информация о количественном значении теплоемкости продуктов сгорания необходима для расчета теплообмена в хвостовых поверхностях котла.

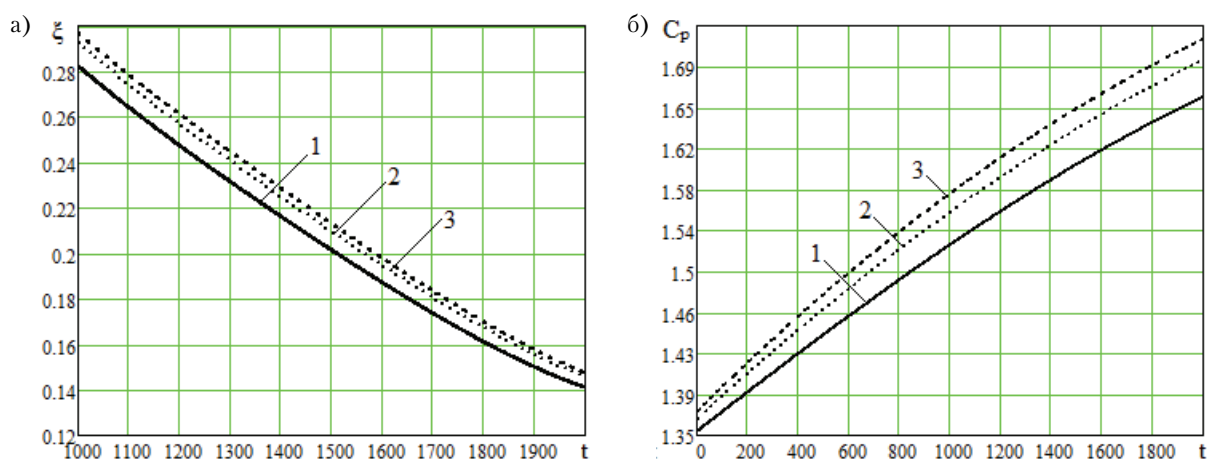


Рисунок – Теплообменные параметры продуктов сгорания природного газа и биогазов в зависимости от степени черноты  $\xi$  (а) и теплоемкости  $C_p$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К) (б) продуктов сгорания природного газа (1) и двух составов биогаза (2, 3) от температуры.

Для более полного анализа теплофизических характеристик продуктов сгорания в случае доминирования конвективной составляющей передачи тепла (диапазон температур 100...1 000 °С) проведен анализ изменения коэффициента теплопроводности и кинематической вязкости дымовых газов для исследуемых составов топлив. В результате получено практически полное совпадение кривых.

## ВЫВОДЫ

В работе исследованы теплообменные характеристики искусственного газа – биогаза и проведено сравнение результатов с традиционным газообразным топливом – природным газом. Отмечено, что для исследованных искусственных газов степень черноты продуктов сгорания выше, что связано с увеличенным содержанием CO<sub>2</sub> в исходном топливе и, соответственно, в продуктах сгорания. В среднем увеличение степени черноты для первого состава топлива составило 2,5 %, для второго – 3,4 %. Увеличение значений теплоемкости продуктов сгорания биогаза в отличие от природного газа составляет в среднем 2 % для первого состава и 3,1 % для второго состава биогаза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития [Текст] / Л. С. Орлик, Н.Т. Сорокин, В. Ф. Федоренко [и др.]. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 404 с.
2. Актуальные проблемы энергетики АПК [Текст] / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2013. – 378 с.
3. Alemayehu, Yitayal Addis. Enhancement and Optimization Mechanisms of Biogas Production for Rural Household Energy in Developing Countries [Текст] / Yitayal Addis Alemayehu // International Journal of Renewable Energy Development. – 2015. – Vol. 4, № 3. – P. 189–196.
4. Mulinda, Cyimana. Dissemination and Problems of African Biogas Technology [Текст] / Cyimana Mulinda, Qichun Hu, Ke Pan // Energy and Power Engineering. – 2013. – Vol. 5. – P. 506–512.
5. Бирюков, А. Б. Анализ технологии производства биогаза из органических отходов для замены природного газа [Текст] / А. Б. Бирюков, П. А. Гнitiев, И. П. Дробышевская // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 1(7). – С. 25–31.
6. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах [Текст] : Монография / А. Б. Бирюков. – Донецк : Ноулидж, Донецкое отделение, 2012. – 247 с.
7. Weiland, P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany [Текст] / Peter Weiland // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – Volume 109, Issue 1–3. – P. 263–274.
8. Казанцев, Е. И. Промышленные печи [Текст] / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.

Получено 19.09.2017

## П. А. ГНІТІЙОВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОГАЗУ ДОНУ ВПО «Донецький національний технічний університет»

**Анотація.** В роботі проаналізовані основні теплофізичні характеристики штучного палива – біогазу. Показано, що в порівнянні з природним газом ступінь чорноти продуктів згоряння у біогазу вище на 3 %, теплоємність вище на 2,6 %.

**Ключові слова:** біогаз, теплообмін випромінюванням, ступінь чорноти, теплообмінні характеристики газів.

## PAVEL GNITIEV INVESTIGATION OF HEAT-EXCHANGE CHARACTERISTICS OF COMBUSTION PRODUCTS DURING BIOGAS COMBUSTION Donetsk National Technical University

**Abstract.** The paper analyzes the main thermo physical characteristics of artificial fuel – biogas. It has been shown that, in comparison with natural gas, the degree of blackness of the combustion products in biogas is higher by 3 %, the heat capacity is higher by 2,6 %.

**Key words:** biogas, radiant heat exchange, degree of blackness, heat exchange characteristics of gases.

**Гни́тьев Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: металлургическая теплотехника, ресурсоэнергосберегающие технологии, оптимизация энергозатрат.

**Гні́тьов Павло Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики ДОНУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: металургійна теплотехніка, ресурсоенергозберігаючі технології, оптимізація енерговитрат.

**Gnitiev Pavel** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technical Thermo physics Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: metallurgical heat engineering, resource-energy-saving technologies, optimization of energy costs.