

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71

*\*Леонов Е.С., Трубаев П.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: wunnerr@yandex.ru*

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БИОГАЗА НА ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

**Аннотация.** *Продукты сгорания биогаза и природного газа различаются по содержанию компонентов, что оказывает влияние на их теплосодержание и теплообмен в котлах. Для определения возможности использования биогаза в котлах, разработанных для сжигания природного газа, в работе произведено сравнение теплофизических свойств продуктов сгорания природного газа и биогаза и их влияние на результаты расчета котлов. Были получены методы расчета теплопроводности и вязкости смеси газов в зависимости от их состава и температуры. Сравнение показало, что калориметрические и теплофизические свойства продуктов сгорания биогаза отличаются от свойств продуктов сгорания природного газа на величину до 4 %, а отличия от справочных свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, составляет в среднем 6 %. Произведено сравнение результатов поверочного тепловой расчета водогрейных котлов малой мощности КВМГ-1,0 и КСВ-1,0 с использованием свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, и при их расчете по предложенным уравнениям. Расчеты показали, что результаты расчета по справочным данным нормативного метода приводят к более высоким значениям температур отходящих газов и расходу топлива. Можно заключить, что природный газ в котлах может заменяться биогазом без необходимости реконструкции котла, но для тепловых расчетов необходимо учитывать изменение состава и свойств продуктов сгорания топлива.*

**Ключевые слова:** *биогаз, альтернативное топливо, местные газы, природный газ, свойства продуктов сгорания, теплопроводность, вязкость.*

**1. Введение.** Биогаз – это газ, образующийся при анаэробном сбраживании органических веществ. Использование биогаза приводит к уменьшению потребления природного топлива, что имеет как экономическое, так и экологическое значение [1]. Кроме того, парниковый эффект от метана в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа, поэтому сбор и сжигание метана, выделяющегося при разложении сельскохозяйственных отходов или на полигонах ТКО, решает задачи борьбы с глобальным потеплением [2]. В мире есть большое количество примеров использования биогаза для локальной выработки тепловой и электрической энергии [3] и создания на его основе распределенных систем энергоснабжения [4] или в системах централизованного теплоснабжения для сельской местности [5]. О влиянии биогаза на конструкцию котлов в исследованиях имеются различные мнения. В работе [6] при экспериментальном исследовании установлено, что основное влияние на процесс горения оказывает высокое содержание в биогазе  $\text{CO}_2$ , но для разных смесей биогаза горелочное устройство может использоваться без каких-либо изменений. В работе [7] делается вывод, что наличие  $\text{CO}_2$  указывает на необходимость увеличения размеров камеры сгорания. Как правило, биогаз является местным топливом (используется в местах его генерации) [8], поэтому его использование актуально в котлах и электрогенераторах небольшой мощности. Для использования биогаза

рассматривается как проектирование специальных котлов, так и использование существующих, выпускаемых для использования природного газа. В работе [9] предлагается перевод отопительного водогрейного котла на биогазовое топливо путем замены горелочного устройства для подачи большего объема газа. Но кроме замены горелок необходимо учитывать и изменение процессов теплообмена в котлах, что может привести к необходимости изменения их конструкции.

В работе рассматривалось изменение режимов работы котлов при замене природного газа на биогаз. Состав рассматриваемых топлив приведен в табл. 1.

Отличие состава продуктов сгорания природного газа и биогаза заключается в увеличении доли  $\text{CO}_2$  в 1,6...1,7 раз (из-за большого содержания  $\text{CO}_2$  в биогазе) и из-за этого уменьшении доли остальных газов (табл. 2). Но при расходе топлива, обеспечивающей одинаковое тепловыделение 1 МВт, расход воздуха, подаваемый на горение, и объем продуктов сгорания для природного газа и биогаза практически одинаковы. Тепловой расчет котельных агрегатов включает расчет теплового баланса и теплообмена. Теплосодержание отходящих газов зависит от их расхода и состава (определяющей так же их теплоемкость). В расчёте теплообмена используются коэффициенты теплоотдачи конвекцией от газов к поверхностям теплообмена, которые зависят от вязкости и теплопроводности газов, и

тепловой поток излучением, который зависит от доли трехатомных газов в продуктах сгорания.

Таблица 2

**Отличия состава продуктов горения биогаза и природного газа ( $\alpha = 1,1$ )**

Вид топлива	Состав продуктов сгорания при $\alpha = 1,1$				Объемные расходы при нормальных условиях					Теоретическая температура горения, $t_r, ^\circ\text{C}$
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	удельные, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> топлива		м <sup>3</sup> /с (для тепловой мощности котла 1 МВт, при КПД = 87,4%)			
					воздуха	продуктов сгорания	топлива	воздуха	продуктов сгорания	
ПГ	8,7 %	17,4 %	72,1 %	1,7 %	10,44	11,45	0,0320	0,334	0,366	1813
Б57	13,8 %	16,6 %	68,0 %	1,6 %	5,87	6,88	0,0561	0,330	0,386	1713
Б35	14,8 %	15,9 %	67,9 %	1,5 %	3,40	4,40	0,0913	0,310	0,402	1660

Таким образом изменение объемов и состава продуктов сгорания будет влиять на теплообмен в котлах и на теплосодержание газового потока, то есть приведет к изменению режима работы котла. При тепловых расчетах котлов используется нормативный метод [10], в котором коэффициенты конвективной теплоотдачи принимаются по номограммам, составленным с использованием свойств продуктов сгорания природного газа среднего состава. При изменении состава продуктов сгорания предлагается пересчет их свойств (коэффициентов теплопроводности, вязкости и критерия Pr) с использованием коэффициента, зависящего от объемной доли водяных паров. Но согласно табл. 2 объемная доля водяных паров для продуктов сгорания биогаза и природного газа отличается незначительно, основное отличие – в объемной доле CO<sub>2</sub>. Поэтому для расчета котлов, работающих на биогазе необходимо исследование, влияет ли изменение свойств продуктов сгорания на режим работы котла и необходимо ли разработка методов расчета этих свойств, или использование данных нормативного метода [10] обеспечит приемлемые для инженерных расчетов результаты.

$$c_p = a_0 + a_1\Theta + a_2\Theta^2 + a_3\Theta^3 + a_4/(\Theta+0,273)^4, \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}, \tag{1}$$

где  $\Theta = 0,001t$  – нормированное значение температуры  $t, ^\circ\text{C}$ ;  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты.

Для этого в работе были решены следующие задачи:

- разработка методов расчета вязкости и теплопроводности для смеси газов;
- сравнение значений свойств продуктов сгорания различных топлив;
- выполнение поверочного расчета водогрейных котлов и исследование влияния изменения состава продуктов сгорания на тепловой режим;

**2. Расчет калориметрических и теплофизических свойств смеси газов.**

*2.1. Теплоемкость смеси газов (калориметрические свойства).*

Теплоемкость смеси газов подчиняется аддитивному правилу. Для расчета средней на интервале температур  $0 \dots t$  объемной удельной теплоемкости газов использованы табличные данные свойств работы [12], где данные приведены в более широком диапазоне температур, чем в других источниках, и аппроксимирующее уравнение, включающее полином третьей степени и обратную зависимость:

Полученные коэффициенты приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для удельной объемной теплоемкости  $c_p$**

Газ	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Коэффициенты уравнения (1):					
$a_0$	1,599	1,495	1,306	1,294	1,733
$a_1$	0,934	0,19	0,217	0,084	0,888
$a_2$	-0,384	0,058	-0,056	0,0184	-0,509
$a_3$	0,061	-0,017	0,0066	-0,0062	0,122
$a_4$	-	-0,003	-	-0,003	-
Коэффициент детерминации $r^2$	0,9980	0,9947	0,9988	0,9987	0,9991
Средняя абсолютная ошибка (MAPE)	0,218 %	0,37 %	0,336 %	0,321 %	0,208 %
Диапазон температур	0...3000 $^\circ\text{C}$				0...1700 $^\circ\text{C}$

2.2. Вязкость и теплоемкость смеси газов (теплофизические свойства).

Для уточнения теплового расчета котлов, работающих на биогазе, в работе получены уравнения расчета динамической вязкости и теплопроводности смеси газов заданного состава. Был произведен выбор способа расчета свойств смеси, для получения адекватного результата, и поиск и аппроксимация свойств отдельных газов на диапазоне температур до 2500°C.

Динамическая вязкость смеси газов  $\mu_{см}$  определялась по выражению, предложенному в работе [13]:

$$\mu_{см} = \frac{\sum(x_i \mu_i \sqrt{M_i \cdot T_{кр. i}})}{\sum(x_i \sqrt{M_i \cdot T_{кр. i}})}, \quad (2)$$

где  $i$  – компонент смеси;  $M_i$  – молекулярная масса, кг/моль;  $x_i$  – объемная доля;  $\mu_i$  – динамическая вязкость, Па·с;  $T_{кр. i}$  – критическая температура, К.

Теплопроводность смеси газов  $\lambda_{см}$  определялась по выражению, предложенному в работе [14], которое на примере двухкомпонентной смеси имеет вид:

$$\lambda_{см} = \frac{\lambda_1}{1 + \sum A_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + \sum A_{21} \frac{x_1}{x_2}}, \quad (3)$$

где 1, 2 – компоненты смеси;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности;  $x_1, x_2$  – объемные доли;

коэффициенты  $A_{12} A_{21}$  имеют вид:

$$A_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_1}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_2}},$$

$$A_{21} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2 \cdot d_2}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1}}, \quad (4)$$

где  $d_{1,2}$  – диаметры молекул каждого из компонентов;  $m_{1, 2}$  – массы молекул каждого из компонентов.

В литературе имеется большое количество табличных данных для расчета вязкости и теплопроводности отдельных газов, но, как правило, они приводятся для диапазона температур до 1000 °С. Методы расчета свойств газа при более высоких температурах приведены для широкого диапазона давлений и основаны на вириальных уравнениях состояния, которые для рассматриваемых задач избыточны. Поэтому был произведен поиск экспериментальных данных свойств газа в диапазонах температур 0...2500 °С, выбраны аппроксимирующие уравнения, обеспечивающие необходимую точность при приемлемой сложности, и произведена оценка их коэффициентов.

Использовано уравнение для расчета кинематической вязкости:

$$\mu = (a_0 + a_1 \Theta + a_2 \Theta^2 + a_3 \Theta^3 + a_4 \Theta^4 + a_5 \Theta^5) 10^{-6}, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (5)$$

где  $\Theta = 0,001t$  – нормированное значение температуры  $t$ , °С;  $a_0, a_1, \dots, a_5$  – коэффициенты (табл. 3).

Таблица 4

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для динамической вязкости  $\mu$

Газ	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Источник данных	[15]	[15, 16]	[15]	[17]	[15]
Коэффициенты уравнения (2):					
$a_0$	13,33	8,27	19,2	16,6	11,6
$a_1$	45,5	38,2	58,4	46,86	47,5
$a_2$	-12,9	9,53	-36,8	-32,08	-42,3
$a_3$	-2,42	-11,12	16,87	21,75	95,5
$a_4$	3,32	2,78	-3,22	-8,33	-111,9
$a_5$	-0,545	-0,213	0,215	1,27	44,8
Коэффициент детерминации $r^2$	0,9988	0,9991	0,9997	0,9999	0,9999
Средняя абсолютная ошибка (MAPE)	1,83 %	0,524 %	0,874%	0,133 %	0,203 %
Диапазон температур	100...3700°C	100...5700°C	178...5700°C	-73...2200°C	0...1000°C

Для расчета коэффициентов теплопроводности выбрано уравнение:

$$\lambda = \frac{a_0 + a_1 \Theta + a_2 \Theta^2 + a_3 \Theta^3}{1 + b_1 \Theta + b_2 \Theta^2 + b_3 \Theta^3 + b_4 \Theta^4} \cdot 10^{-2}, \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \quad (6)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты (табл. 4).

Критерий Прандтля смеси газов может быть

рассчитан по теплопроводности, динамической вязкости и массовой теплоемкости смеси.

На основе выбранных и полученных уравнений создана библиотека расчета теплофизических свойств смеси газов, которая в дальнейшем была использована при поверочном расчете котлов.

Таблица 5

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений для теплопроводности  $\lambda$ 

Газ	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Источник данных	[15]	[15, 16]	[15]	[17]	[15]
Коэффициенты уравнения (5):					
$a_0$	14,5	16,8	24,3	23,7	8,3
$a_1$	-0,859	-1,5112	-0,7733	0,457	35
$a_2$	70,12	50,35	51	84,7	-11,2
$a_3$	0,244	0,8612	0,2009	-0,188	0
$b_1$	-77,6	-61,384	-53,85	-1,926	-0,556
$b_2$	-0,018	-0,21675	-0,01652	0,0373	0,114
$b_3$	24,1	16,897	13,92	0	0
$b_4$	0	0,020354	0	0	0
Коэффициент детерминации $r^2$	0,9991	0,9996	0,9998	0,9999	0,9999
Средняя абсолютная ошибка (МАРЕ)	1,6%	1,09%	1,14%	1,54%	0,296%
Диапазон температур	0...3300°C	100...3300°C	0...2200°C	0...3300°C	0...1000°C

**3. Результаты и обсуждение.**

продуктов сгорания, рассматриваемых в работе (табл. 1, 2).

**3.1. Сравнение свойств продуктов сгорания.**

Для сравнения в табл. 6 приведены свойства

Таблица 6

## Свойства продуктов сгорания (ПС)

Температура, °C	Справочные данные для ПС природного газа при $\alpha = 1,1$ ( $\nu, \lambda, Pr - [10]; c_p - [12]$ )	Результаты расчета по полученным уравнениям, при сгорании топлив			Среднее отклонение свойств ПС биогаза от	
		природного газа (ПГ)	биогаза, 57% метана (Б57)	биогаза, 35% метана (Б35)	справочных данных	ПС природного газа
Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}$ , Па·с						
100	20,8	20,2	19,5	19,4	-6,5 %	-3,8 %
500	73,0	74,6	72,3	71,8	-1,3 %	-3,5 %
1000	167	175	170	168	1,2 %	-3,6 %
1500	300	302	292	289	-3,1 %	-3,7 %
2000	448	447	434	430	-3,5 %	-3,2 %
Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^{-2}$ , Вт/м·К						
100	2,69	2,89	2,85	2,85	5,9 %	-1,3 %
500	5,64	5,67	5,64	5,63	0,0 %	-0,6 %
1000	9,37	9,32	9,27	9,22	-1,3 %	-0,8 %
1500	13,2	13,6	13,6	13,5	2,3 %	-0,5 %
2000	17,1	21,1	21,7	21,6	26,6 %	2,6 %
Удельная объемная теплоемкость $c_p$ , кДж/м <sup>3</sup> ·К						
100	1,37	1,389	1,406	1,409	2,7 %	1,3 %
500	1,44	1,485	1,513	1,517	5,2 %	2,0 %
1000	1,53	1,580	1,615	1,621	5,8 %	2,4 %
1500	1,60	1,654	1,692	1,698	6,0 %	2,5 %
2000	1,66	1,711	1,751	1,757	5,7 %	2,5 %
Критерий Прандтля $Pr$						
100	0,70	0,728	0,711	0,708	1,4 %	-2,5 %
500	0,62	0,707	0,688	0,685	10,7 %	-3,0 %
1000	0,58	0,656	0,638	0,636	9,8%	-2,9%
1500	0,53	0,586	0,568	0,567	7,0%	-3,2%
2000	0,49	0,453	0,428	0,426	-12,9%	-5,7%

Отличия свойств продуктов горения биогаза от свойств усредненного состава продуктов горения, используемых в нормативном методе [10], при высоких температурах составляет до 6 %, достигая для теплопроводности 27 % при температуре 2000°C.

Свойства продуктов горения биогаза отличаются от свойств продуктов горения природного газа на 3...4 % для вязкости, до 3 % для теплопроводности и теплоемкости и до 6 % для критерия Прандтля. Так как данные свойства используются для расчета коэффициента конвективного теплообмена в котле, его значения так же могут отличаться на эти величины.

### 3.2. Сравнение результатов теплового расчета котлов.

Режим работы котла определяется системой

$$V_T Q_H^P - V_{o.g} c_{o.g} t''_{o.g} - Q_{пот} = Fk\varepsilon \frac{(t_{гор} - t''_B) - (t''_{o.g} - t'_B)}{\ln \frac{(t_{гор} - t''_B)}{(t''_{o.g} - t'_B)}}, \quad (7)$$

где  $G_B$  – расход нагреваемой воды;  $V_T$  – расход топлива;  $V_{o.g}$  – выход отходящих газов (продуктов горения);  $Q_H^P$  – теплота сгорания газа;  $c_B, c_{o.g}$  – теплоемкость воды и отходящих газов (соответственно массовая и объёмная);  $t'_B, t''_B$  – температура воды на входе и выходе котла;  $t''_{o.g}$  – температура отходящих газов после котла;  $t_{гор}$  – температура горения, может быть определена по уравнению  $t_{гор} = V_{c.l} Q_H^P / (c_{o.g} V_{o.g})$ ;  $\varepsilon$  – поправочный коэффициент для температурного напора при смешанном теплообмене.

Из уравнения (7) может быть определена одна неизвестная – температура газа на выходе или расход топлива (тепловая мощность котла).

Для исследования влияния свойств продуктов горения различных топлив на результаты теплового расчета был произведен расчет двух водогрейных котлов теплопроизводительностью 1 МВт: жаротрубного котла КСВ-1,0 и водотрубного котла КВГМ-1,0.

Поверочный тепловой расчет котельного агрегата был автоматизирован (выполнен в виде расчетной программы) и выполнялся по нормативному методу [10] и работам [18, 19] и включал расчет следующих зон: для жаротрубного котла – топки, поворотной камеры, дымогарных труб второго и третьего хода; для водотрубного котла – топки и конвективной поверхности. Для каждой зоны температуру газов на выходе определяли из условия равенства количества теплоты, передаваемой от газов к воде, рассчитанной по тепловому балансу и по уравнению теплообмена. Для обеспечения сходимости теплового баланса котельного агрегата использовались два варианта:

а) задавалось значение теплоты, выделяемой

из двух уравнений – теплового баланса и теплопередачи, которые определяют, какое количество теплоты, выделившись в котле от сгорания топлива может быть передано теплоносителю:

$$\begin{cases} Q = Q_G - Q_{o.g} - Q_{пот}; \\ Q = Fk\Delta t, \end{cases}$$

где  $Q$  – количество передаваемой теплоты в котле от газов к воде (тепловая мощность котла);  $Q_G$  – теплота, выделившаяся при сгорании газа;  $Q_{o.g}$  – величина потерь теплоты с отходящими газами;  $Q_{пот}$  – величина потерь теплоты через стенки котла;  $F$  – поверхность теплообмена;  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $\Delta t$  – температурный напор.

Таким образом уравнение, описывающее тепловую работу котла, имеет вид.

при сжигании топлива, температура газов после котла определялась расчетом ( $Q = \text{const}$ );

б) задавалось значение температуры отходящих газов, подбирался расход топлива, обеспечивающий эту заданную температуру ( $t_{o.g} = \text{const}$ ).

Первоначально был произведен расчет базового варианта с топливом – природным газом (ПГ). Затем котлы с топливом – биогазом рассчитывались двумя способами:

«Н» – коэффициенты конвективной теплоотдачи определялись с использованием данных, приведенных в нормативном методе теплового расчета [10], где они приведены для продуктов горения природного газа среднего состава;

«Р» – расчет коэффициентов конвективной теплоотдачи с использованием свойств продуктов сгорания, определяемых по их составу с использованием предложенных в разделе 2 уравнений.

Результаты расчета приведены в табл. 7. Отличие работы котлов на природном газе и биогазе определяется более низкой температурой горения биогаза и уменьшением температурного напора, что требует увеличения расхода топлива.

Если использовать при расчете котлов нормативный метод, то замена природного газа на биогаз приводит к повышению температуры отходящих газов после котлов на величину от 2 до 5°C для жаротрубного котла и на величину от 5 до 9°C для водотрубного котла. Если же свойства продуктов сгорания рассчитывать по их составу, то увеличения температуры газов для жаротрубного котла практически нет, для водотрубного она увеличивается на величину от 1 до 5°C. Различие в необходимом расходе топлива и КПД котла составляет около 0,5 %. Это объясняется

разными значениями коэффициента теплопередачи, который зависит от значений коэффициентов теплоотдачи конвекцией, то есть от свойств

продуктов сгорания, и излучением, который зависит от доли трехатомных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в продуктах сгорания.

Таблица 7

### Результаты поверочного теплового расчета котлов (для тепловой мощности 1 МВт)

Топливо	ПГ	Б57		Б35	
		Н	Р	Н	Р
Метод расчета	Н	Н	Р	Н	Р
<b>Котел КСВ-1,0</b>					
Часовой расход топлива $B$ , м <sup>3</sup> /ч:	114,8	203,9	202,6	334,5	332,4
Температуры газа $t$ , °С:					
на выходе из топки $t_t$	1005	1012	1036	1016	1040
после поворотной камеры $t_{п.к}$	899	905	917	913	926
после первой конвективной поверхности $t_2$	364	368	362	374	369
Температура отходящих газов $t_{о.г}$	185	187	182	190	185
КПД котла $\eta$ , %	87,4	86,8	87,3	86,2	86,7
<b>Котел КВГМ-1,0</b>					
Расход топлива $B$ , м <sup>3</sup> /ч:	150,0	264,6	263,2	434,4	432,1
Температуры газов на выходе из топки $t_t$ , °С:	831	855	865	865	874
Температура отходящих газов $t_{о.г}$	185	190	186	194	190
КПД котла $\eta$ , %	87,5	86,8	87,2	86,1	86,5

**4. Выводы.** Полученные результаты показывают, что calorиметрические и теплофизические свойства продуктов сгорания биогаза отличаются от свойств продуктов сгорания природного газа на величину до 4%:

– удельная объемная теплоемкость на величину 1,3...2,5 %;

– кинематическая вязкость на величину 3,2...3,8 %;

– коэффициент теплопроводности и критерий Прандтля на величину до 3 %.

Отличия от справочных свойств продуктов сгорания, приведенных в нормативном методе расчета котельных агрегатов, составляет в среднем 6 %.

Это приводит к изменению значений теплоемкости газового потока коэффициента теплопередачи в котле, то есть влияет на теплообмен в котлах и приведет к изменению режима работы котла.

Значение отклонений показывают, что природный газ в котлах может заменяться биогазом без необходимости реконструкции котла, но для тепловых расчетов необходимо учитывать изменение состава и свойств продуктов сгорания топлива.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Sica D., Esposito B., Supino S., Malandrino O., Sessa M.R. Biogas-based systems: An opportunity towards a post-fossil and circular economy perspective in Italy // *Energy Policy*. 2023. Vol. 182. 113719. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113719.
- Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- Abusoglu A., Tozlu A., Anvari-Moghaddam A. District heating and electricity production based on biogas produced from municipal WWTPs in Turkey: A comprehensive case study // *Energy*. 2021. Vol. 223. 119904. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119904.
- Jabbary A., Noroozian R., Gharehpetian G.B. Optimum utilization of hub energy micro-grids with micro-networking strategy of local biogas productions // *Heliyon*. 2023. Vol. 9(11). e20995. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20995.
- Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. 116591. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116591.
- Sivri I., Yilmaz H., Cam O., Yilmaz I. Combustion and emission characteristics of premixed biogas mixtures: An experimental study // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, Iss. 24. Pp. 12377–12392. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.119.

7. Abdulnaim A., Elkholy A., Elmously M., Moneib H., Roberts W.L., Elbaz A.M. On the Stability and Characteristics of Biogas/Methane/Air Flames Fired by a Double Swirl Burner // Flow, Turbulence and Combustion. 2023. Vol. 112. Iss. 3. Pp. 751–767. DOI: 10.1007/s10494-023-00427-0.

8. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.007.

9. Jaffrin A., Bentounes N., Joan A.M., Makhlouf S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth // Biosystems Engineering. 2003. Vol. 86, Iss. 1. Pp. 113–123. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00110-7.

10. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / 3-е изд., перераб. и дополн. СПб.: Изд-во НПО КЦТИ, 1998. 256 с.

11. Трубаев П.А., Веревкин О.В. Исследование состава биогаза на полигоне ТКО «Стрелецкое» // Энергетические системы. 2024. № 3. С. 122–145. DOI: 10.34031/es.2023.4.009.

12. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчётов и проектирования. М.: Металлургия, 1964. 452 с.

13. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. М.: Химия, 1971. 450 с.

14. Цедерберг Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.

15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

16. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во МЭИ, 2020. 168 с.

17. Варгафтик Н.Б., Филлипов Л.П., Тарзианов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

18. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчет жаротрубно-дымогарного котла. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. 31 с.

19. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчет водогрейного котла. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. 41 с.

#### Информация об авторах

**Леонов Евгений Сергеевич**, аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии. E-mail: wunnerr@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Трубаев Павел Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии. E-mail: trubaev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.04.2024 г.

© Леонов Е.С., Трубаев П.А., 2024

**\*Leonov E.S., Trubaev P.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: wunnerr@yandex.ru*

## INFLUENCE OF THERMAL PHYSICAL PROPERTIES OF BIOGAS COMBUSTION PRODUCTS ON THE THERMAL PARAMETERS OF WATER HEATING BOILERS

**Abstract.** *The combustion products of biogas and natural gas differ in the content of components, which affects their heat content and heat exchange in boilers. To determine the possibility of using biogas in boilers designed for burning natural gas, the work compares the thermophysical properties of the combustion products of natural gas and biogas and their influence on the results of boiler calculations. Methods were obtained for calculating the thermal conductivity and viscosity of a mixture of gases depending on their composition and temperature. The comparison showed that the calorimetric and thermophysical properties of biogas combustion products differ from the properties of natural gas combustion products by up to 4 %, and the difference from the reference properties of combustion products given in the standard method for calculating boiler units is on average 6 %. A comparison has been made of the results of verification thermal calculations of low-power hot water boilers KVMG-1.0 and KSV-1.0 using the properties of combustion products given in the standard method for calculating boiler units, and when calculating them using the proposed equations. Calculations have shown that the results of calculations based on reference data of the standard method lead to higher values of exhaust gas temperatures and fuel consumption. It can be concluded that natural gas in boilers*

can be replaced by biogas without the need to reconstruct the boiler, but for thermal calculations it is necessary to take into account changes in the composition and properties of fuel combustion products.

**Keywords:** biogas, alternative fuel, local gases, natural gas, properties of combustion products, thermal conductivity, viscosity.

## REFERENCES

1. Sica D., Esposito B., Supino S., Malandrino O., Sessa M.R. Biogas-based systems: An opportunity towards a post-fossil and circular economy perspective in Italy. *Energy Policy*. 2023. Vol. 182. Pp. 113719. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113719.

2. Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. Pp. 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.

3. Abusoglu A., Tozlu A., Anvari-Moghadam A. District heating and electricity production based on biogas produced from municipal WWTPs in Turkey: A comprehensive case study. *Energy*. 2021. Vol. 223. 119904. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119904.

4. Jabbari A., Noroozian R., Gharehpetian G.B. Optimum utilization of hub energy micro-grids with micro-networking strategy of local biogas productions. *Heliyon*. 2023. Vol. 9 (11). e20995. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20995.

5. Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. Pp. 116591. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116591.

6. Sivri I., Yilmaz H., Cam O., Yilmaz I. Combustion and emission characteristics of premixed biogas mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47 (24). Pp. 12377–12392. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.119.

7. Abdulnaim A., Elkholy A., Elmously M., Moneib H., Roberts W.L., Elbaz A.M. On the Stability and Characteristics of Biogas/Methane/Air Flames Fired by a Double Swirl Burner. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2023. Vol. 112 (3). Pp. 751–767. DOI: 10.1007/s10494-023-00427-0.

8. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 774–786. DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.007.

9. Jaffrin A., Bentounes N., Joan A.M., Makhlouf S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant

Growth. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86(1). Pp. 113–123. DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00110-7.

10. Thermal calculation of boiler units. Normative method 3rd ed., revised. and additional [Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov. Normativnyj metod 3-e izd., pererab. i dopoln]. SPb.: NPO KCTI, 1998. 256 p. (rus)

11. Trubaev P.A., Verevkin O.V. Study of the composition of biogas at the Streletskoye MSW landfill [Issledovanie sostava biogaza na poligone TKO «Streleczkoe» / Energeticheskie sistemy]. 2024. No 3. 122–145. DOI: 10.34031/es.2023.4.009. (rus)

12. Kazancev E.I. Industrial furnaces: A reference guide for calculations and design [Promyshlennye pechi: Spravochnoe rukovodstvo dlya raschyotov i proektirovaniya]. M.: Metallurgiya, 1964. 452 p. (rus)

13. Florea O., Smigel'skij O. Calculations for processes and apparatus of chemical technology [Raschety po processam i apparatam himicheskoj tekhnologii]. M.: Himiya, 1971. 450 p. (rus)

14. Cederberg N.V. Thermal conductivity of gases and liquids [Teploprovodnost' gazov i zhidkostej]. M. L.: Gosenergoizdat, 1963. 408 p. (rus)

15. Vargaftik N.B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids [Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej]. M.: Nauka, 1972. 720 p. (rus)

16. Aleksandrov A.A., Grigor'ev B.A. Tables of thermophysical properties of water and water vapor [Tablicy teplofizicheskikh svojstv vody i vodyanogo para]. M.: MEI, 1999. 168 p. (rus)

17. Vargaftik N.B., Fillipov L.P., Tarzimanov A.A., Tockij E.E. Handbook of thermal conductivity of liquids and gases [Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostej i gazov]. M.: Energoatomizdat, 1990. 352 p. (rus)

18. Lummi A.P., Munc V.A. Calculation of a fire-tube-smoke boiler [Raschet zharotrubno-dymogarnogo kotla]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU–UPI, 2009. 31 p. (rus)

19. Lummi A.P., Munc V.A. Calculation of a hot water boiler [Raschet vodogrejnogo kotla]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU–UPI, 2009. 41p. (rus)

## Information about the authors

**Leonov, Evgeny S.** Post graduate student of Department of Energy Engineering of Heat Technologie. E-mail: wunnerr@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

**Trubaev, Pavel A.** Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technologie. E-mail: trubaev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 26.04.2024*

**Для цитирования:**

Леонов Е.С., Трубаев П.А. Влияние теплофизических свойств продуктов сгорания биогаза на тепловые параметры водогрейных котлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71

**For citation:**

Leonov E.S., Trubaev P.A. Influence of thermal physical properties of biogas combustion products on the thermal parameters of water heating boilers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71