

УДК 628.474.3:662.767.2

РАСЧЕТ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ БИОГАЗА И RDF-ТОПЛИВА

Ст. преп. **Корнилова Н.В.**Д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

Аннотация. В работе предложен метод расчета горения при совместном сжигании твердого и газообразного топлива. Расчет предлагается проводить на единицу выделяемой при горении суммарной тепловой мощности, а не на единицу массы или объема топлива. Метод апробирован для оценки выброса парниковых газов при сжигании различных видов топлив и при совместном сжигании отходов и свалочного газа. При сгорании углей и отходов содержание CO_2 в продуктах сгорания составляет около $0,05 \text{ м}^3/\text{МВт}$, при сжигании природного газа – $0,028 \text{ м}^3/\text{МВт}$, что практически в 1,8 раз ниже, чем для угля. При сжигании биогаза содержание углекислого газа в продуктах сгорания зависит от концентрации метана в биогазе и составляет $0,04 \dots 0,06 \text{ м}^3/\text{МВт}$. Повышенное выделение CO_2 при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но так как биогаз оказывает значительный парниковый эффект из-за содержания в нем метана, сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на $0,6 \dots 1,9 \text{ м}^3/\text{МВт}$ в CO_2 -эквиваленте.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, твердые коммунальные отходы, твердые бытовые отходы, расчет горения, парниковый эффект, совместное сжигание

Введение

В настоящее время нет технологии утилизации твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО или ТБО), сочетающей экономическую эффективность и экологическую безопасность. Большинство систем управления отходами в странах Европы использует низко затратные варианты утилизации в виде захоронения отходов на полигонах [1] или сжигание [2]. Первоначальная цель совместного сжигания отходов и газообразного топлива – стабилизировать тепловыделение в печи и упростить процесс розжига котла, снизив повышенные выбросы, характерные для этого процесса [3]. Так же увеличение температу-



ры газового потока приводит к полному сгоранию находящихся в нем твердых частиц топлива [4] и органических соединений, выделяющихся при низкотемпературном или неполном сгорании [5], что значительно снижает выбросы, образующиеся при сгорании отходов [6].

На полигонах твердых коммунальных (муниципальных) отходов образуется свалочный газ (биогаз), основными компонентами которого является метан CH_4 (35-60%), углекислый газ CO_2 (20-40%) и азот N_2 (до 40%). Свалочный газ так же требует утилизации [7], так как по разным оценкам парниковый эффект метана превышает парниковый эффект углекислого газа в 25-70 раз [8]. Низкая теплота сгорания биогаза и большое количество CO_2 и примесей является основным препятствием для его использования в энергетических электрогенерирующих установках [9].

Еще в 1990 г. Gas Research Institute (USA) разработал систему сжигания для печей ТКО с совместным сжиганием небольшого количества природного газа и свалочного газа (рис. 1). Это позволяло контролировать выбросы диоксинов и фуранов, одновременно стабилизируя тепловую мощность агрегата.

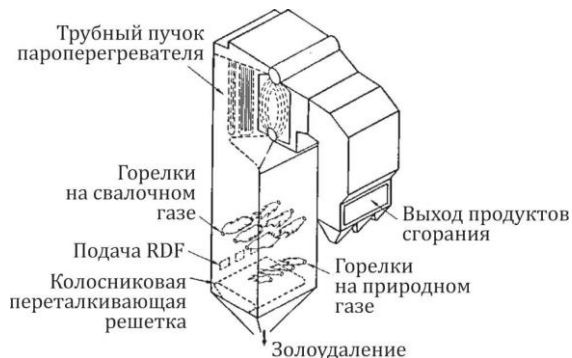


Рис 1. Установка для совместного сжигания отходов, природного газа и биогаза [3]

Были проведены исследования на двух паровых котлах, сжигающих отходы с расходом 13,6 т/ч и 90,7 т/ч. Первоначально котлы были спроектированы для совместного сжигания RDF и угля, но эксплуатация показала неэффективность такого подхода из-за резкого неконтролируемого колебания нагрузки из-за изменения состава RDF, входя-

щих до 20-25%, трудностей розжига и большого количества вредных выбросов. Для совместного сжигания RDF, свалочного и природного газа была разработана двухуровневая горелка. В нижней части топки котла над колосниковой решеткой были расположены горелки для природного газа, обеспечивающие 10% тепловой нагрузки. В средней части топки были расположены горелки для сжигания свалочного или природного газа, так же обеспечивающие 10% нагрузки.

Таким образом для определения возможности совместного сжигания неподготовленных или подготовленных отходов и биогаза необходимо установить возможность получения требуемых температур, что требует выполнения расчета горения.

Целью работы является разработка метода расчета горения при совместном сжигании отходов (твердого топлива) и биогаза (газообразного топлива) и апробирование методики для оценки выброса парниковых газов при различных способах сжигания.

Методика расчета

Единицы удельного расчета и расходы топлив

Расчет предлагается проводить на единицу выделяемой при горении суммарной мощности. В этом случае массовый удельный расход твердого топлива:

$$m_s = (1 - q_g)/Q_s, \text{ кг/МВт}; \quad (1)$$

объемный удельный расход свалочного газа:

$$v_g = q_g/Q_g, \text{ м}^3/\text{МВт}, \quad (2)$$

где q_g – доля энергии, выделяющейся при сгорании свалочного газа, в общей энергии; Q_s – низшая теплота сгорания твердого топлива, МВт/кг; Q_g – низшая теплота сгорания свалочного газа, МВт/м³.

Если задан массовый расход твердого топлива, объемный расход свалочного газа может быть определен по выражению

$$v_g = (1 - m_s Q_s)/Q_g, \quad (3)$$

в обратном случае

$$m_s = (1 - v_g Q_g)/Q_s. \quad (4)$$

Расчет горения при совместном сжигании твердого и газообразного топлив

Элементарный состав отходов представлен следующими элементами:

$$C^r, H^r, O^r, N^r, S^r, A^r, W^r, \text{ массовые \%}$$



Состав газообразного топлива:

CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , CO_2 , H_2 , H_2S , O_2 , N_2 , объемные %

Теоретический объем воздуха, необходимый для горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{air}}^0 = (1 / 29,87) \cdot (2,67C^r + S^r + 8H^r - O^r) \cdot m_s + \\ + 0,0476 \cdot (0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} + \\ + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2) \cdot v_g \quad (5)$$

Действительный объем влажного воздуха для горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{air}} = \alpha V_{\text{air}}^0 (1 + 1,293 / 0,805 \cdot d_{\text{air}}) \quad (6)$$

Состав продуктов горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{cp CO}_2} = 0,01 (1,87C^r + 0,7S^r) \cdot m_s + \\ + 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{S}) \cdot v_g; \quad (7)$$

$$V_{\text{cp H}_2\text{O}} = (0,111\text{H}^r + 0,012\text{W}^r) \cdot m_s + \\ + 0,01(\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{S}) \cdot v_g + \\ + \alpha V_{\text{air}}^0 \cdot 1,293 / 0,805 \cdot d_{\text{air}} + \rho_g / 0,805 \cdot d_g \cdot v_g \quad (8)$$

$$V_{\text{cp N}_2} = 0,79\alpha V_{\text{air}}^0 + 0,008 \text{N}^r \cdot m_s + 0,01\text{N}_2 \cdot v_g \quad (9)$$

$$V_{\text{cp O}_2} = 0,21(\alpha - 1) V_{\text{air}}^0, \quad (10)$$

где d_{air} – влагосодержание воздуха, кг влаги/кг сухого воздуха; где d_g – влагосодержание газообразного топлива, кг влаги/кг газа; ρ_g – плотность газообразного топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$; α – коэффициент избытка воздуха.

Приведенные выражения (11)–(16) могут быть использованы и при расчете на единицу топлива.

При расчете удельных показателей на 1 кг твердого топлива расходы будут равны:

$$m_s = 1 \text{ кг}; v_g = \frac{q_g}{1 - q_g} \frac{Q_s}{Q_g}, \frac{\text{м}^3 \text{ газа}}{\text{кг твердого топлива}}, \quad (11)$$

а при расчете на 1 м^3 биогаза:

$$v_g = 1 \text{ м}^3; m_s = \frac{1 - q_g}{q_g} \frac{Q_g}{Q_s}, \frac{\text{кг твердого топлива}}{\text{м}^3 \text{ газа}}. \quad (12)$$



Апробация расчета для оценки выброса парниковых газов при сжигании топлива

С использованием предложенной методики был произведен расчет выбросов CO₂ для сжигания различных топлив и при совместном сжигании RDF-топлива и свалочного газа.

Исходные данные для расчета

Средний состав углей принят по работе [10], состав ТКО – по работе [11]. При сушке отходов в барабанной сушилке 6х20 м производительностью 1 т/ч отходов с влажностью 50% расход природного газа на нагрев сушильного агента составляет 50 м³/ч. Таким образом теплота сгорания полученного топлива составляет 6,5 ГДж/ч, а тепловая энергия используемого для сушки газа – 1,8 ГДж/ч. Поэтому переработка отходов в RDF топливо связана с высокими энергетическими затратами. Между тем необходимая температура горения (900-1000°C) может быть обеспечена при сжигании отходов даже с влажностью 50% [12]. Поэтому для исследования использован средний состав твердых муниципальных отходов с различной влажностью (табл. 1):

- без подготовки с влажностью 50%;
- частично высушенные отходы с влажностью 30%;
- с влажностью 10%, характерные для RDF-топлива.

В работе [13] на основании исследований фактического выхода биогаза с полигонов ТКО установлено, что состав свалочного газа крайне неравномерен. Поэтому в качестве газообразного топлива рассмотрены три варианта: метан в качестве эталонного топлива, обычный биогаз с содержанием метана 60% и биогаз с низким содержанием метана 35% (табл. 2). Состав биогаза задан исходя из средних значений инструментальных измерений. Учитывались только три компонента в связи с незначительным содержанием остальных.

Таблица 1

Характеристики твердого топлива

Наименование	Элементарный состав, массовые %							Теплота сгорания Q _н ^p , кДж/кг
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	
Антрацит	60,12	1,02	0,93	0,64	2,02	27,36	8,28	21 342
Бурый уголь	34,41	2,51	10,98	0,55	0,57	17,66	33,34	12 278
Каменный уголь	54,79	3,44	7,45	1,24	0,70	22,12	10,25	21 126
RDF-топливо	34,4	4,6	23,0	0,9	0,3	26,9	10,0	13 655
Частично высушенные ТКО	26,8	3,6	17,9	0,7	0,2	20,9	30,0	10 063
Неподготовленные ТКО	19,1	2,5	12,8	0,5	0,1	15,0	50,0	6 470



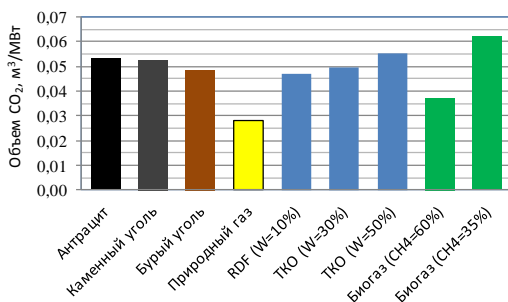
Таблица 2

Характеристики газообразного топлива

Наименование	Состав, объемные %			Плотность ρ , кг/м ³	Теплота сгорания $Q_{нт}^p$, кДж/м ³
	CH ₄	CO ₂	N ₂		
Метан	100	0	0	0,716	35 820
Обычный биогаз	60	20	20	1,072	21 492
Биогаз с низким содержанием метана	35	43	22	1,370	12 537

Результаты расчета выброса парниковых газов для различного топлива

На рис. 2 представлено содержание CO₂ в продуктах сгорания топлива различного вида, отнесенное к его теплоте сгорания.

Рис. 2. Содержание CO₂ в продуктах сгорания топлива

При сгорании углей и отходов выделяется почти в два раза больше углекислого газа, чем при сжигании природного газа. Повышенное выделение CO₂ при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но при сжигании свалочного газа необходимо учитывать, что парниковый эффект от метана в 25...70 раз выше, чем от углекислого газа. Для получения 1 МВт мощности необходимо 0,028 м³ метана. Поэтому сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на 0,6...1,9 м³/МВт в CO₂-эквиваленте. На рис. 3 представлено изменение объема углекислого газа в продуктах сгорания при совместном сжигании отходов и газообразного топлива. Применение для



дожига отходов природного газа и биогаза обычного состава приводит к снижению выбросов парниковых газов. Применение для дожига свалочного газа с низким содержанием метана на объем CO_2 в продуктах сгорания почти не влияет.

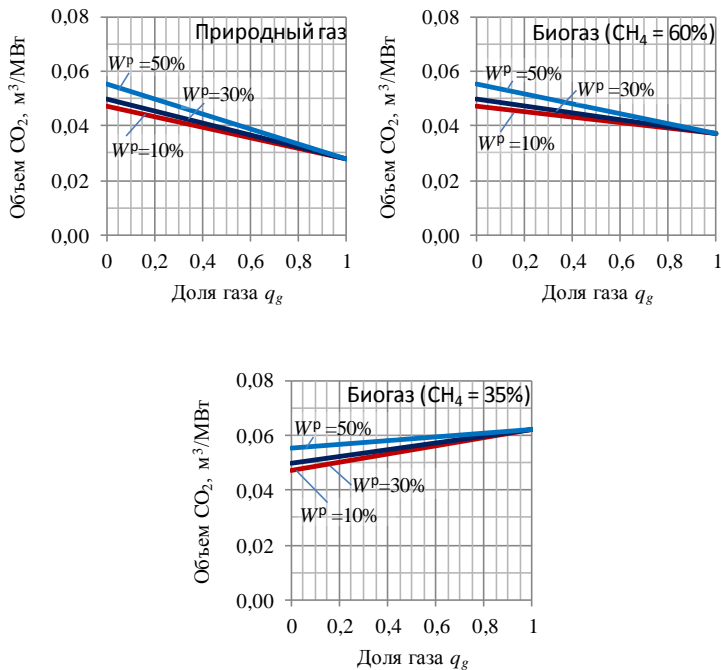


Рис. 3. Содержание CO_2 в продуктах сгорания при совместном сжигании ТКО разной влажности и природного газа и биогаза

Так как при сжигании свалочного газа дополнительно происходит предотвращение выброса в атмосферу метана, произведен расчет снижения парниковых выбросов (рис. 4).

Величина снижения, приведенная к единице теплоты сгорания смеси топлив, от концентрации метана в биогазе не зависит. Так же в связи с высокой величиной снижения парниковых выбросов на ее величину влажность сжигаемых отходов практически не влияет.



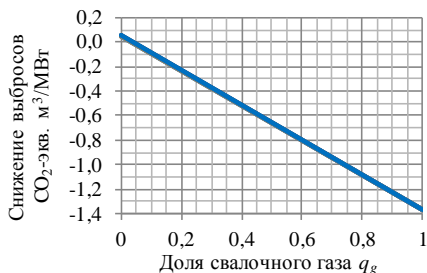


Рис. 4. Снижение выбросов парниковых газов при совместном сжигании отходов и свалочного газа

Выводы

В работе предложен метод расчета горения при совместном сжигании твердого топлива, в том числе отходов или RDF-топлива и газообразного топлива – природного газа или биогаза. Расчет предлагается проводить не на единицу объема или массы топлива, а на единицу суммарной мощности сгорания смеси топлив, в качестве которой принят МВт.

Методика апробирована для оценки выброса парниковых газов при сжигании различных видов топлив и при совместном сжигании отходов и свалочного газа. При сгорании углей и отходов содержание CO₂ в продуктах сгорания составляет около 0,05 м³/МВт, при сжигании природного газа – 0,028 м³/МВт, что практически в 1,8 раз ниже, чем для угля. При сжигании биогаза содержание углекислого газа в продуктах сгорания зависит от концентрации метана в биогазе и составляет 0,04...0,06 м³/МВт. Повышенное выделение CO₂ при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но так как биогаз оказывает значительный парниковый эффект из-за содержания в нем метана, сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на 0,6...1,9 м³/МВт в CO₂-эквиваленте.

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Библиографический список

1. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe / J. Malinauskaite, H. Jouhara, D.Czajczyński et al // Energy. 2017. Vol. 141. P. 2013-2044. DOI: [10.1016/j.energy.2017.11.128](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128).

2. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities / J.M. Fernández-González, A.L. Grindlay, F. Serrano-Bernardo // Waste Management. 2017. Vol. 67. P. 360–374. DOI: [10.1016/j.wasman.2017.05.003](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003).

3. Design of advanced combustion systems for co-firing of natural gas with refuse derived fuels and landfill gas / D.K. Moyeda, G.C. England, W.R. Seeker, D.G. Linz // In Proceedings of National Waste Processing Conference. New York: ASME, 1990. P. 203-210.

4. **Ветрова Ю.В., Васюткина Д.И., Радоуцкий В.Ю.** Модели распространения вредных веществ в окружающей среде // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 159-162. [eLIBRARY ID: [18310440](https://elibrary.ru/18310440)]

5. The formation and control of PCDD/PCDF from RDF-fired combustion systems/ D.K. Moyeda, W.R. Seeker, G.C. England, D.G. Linz // Chemosphere. 1990. Vol. 20(10-12). P. 1817-1824. DOI: [10.1016/0045-6535\(90\)90347-V](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90347-V).

6. **Werther J.** Gaseous emissions from waste combustion // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 144(3). P. 604-613. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.01.116](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.116).

7. Investigation of waste biogas flame stability under oxygen or hydrogen-enriched conditions / N. Striūgas, R. Paulauskas, R. Skvorčinskienė A. Lisauskas // Energies. 2020. Vol. 13(18). P. 4760. DOI: [10.3390/en13184760](https://doi.org/10.3390/en13184760).

9. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Электронный ресурс] / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2015. 151 p. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf.

9. **Суслов Д.Ю., Темников Д.О.** Оптимальное расположение биометановой установки и станции подачи биометана в системы газоснабжения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 196-203. [eLIBRARY ID: [42737925](https://elibrary.ru/42737925)]

10. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2007. 561 с. (Сер. «Теплоэнергетика и теплотехника»; Кн. 2).

11. **Левин Б.И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.



12. Kornilova N.V., Trubaev P.A. Analysis of MSW Combustion temperature in a hot water boiler with the low-capacity // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1066(1). 012003. DOI: [10.1088/1742-6596/1066/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012003). [eLIBRARY ID: [37571786](#)]

13. Investigation of Landfill Gas Output from Municipal Solid Waste at the Polygon / P.A. Trubaev, O.V. Verevkin, B.M. Grishko et al // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1066(1). 012015. DOI: [10.1088/1742-6596/1066/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012015). [eLIBRARY ID: [38619254](#)]



CALCULATION OF BIOGAS AND RDF COFIRING

N.V. Kornilova and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Abstract. The paper suggests the calculation method of combustion when solid and gaseous fuels are cofired. The calculation is suggested to carry out per unit of heat output released during combustion but not per unit of mass or volume of fuel. The method has been tested for evaluation of greenhouse gas emissions during combustion of different fuel types and during waste and landfill gas cofiring. During coal and waste combustion, the CO₂ content in products of combustion is around 0,05 m³/MW, for natural gas combustion - 0,028 m³/MW which is 1,8 times lower than for coal firing. During biogas combustion, the carbon dioxide content in the combustion products depends on the methane concentration in biogas and is around 0,04...0,06 m³/MW. The increased CO₂ emission during biogas combustion in comparison to natural gas is explained by a high carbon dioxide content in biogas itself. Having in mind that biogas creates a significant greenhouse effect due to methane presence in it the landfill gas utilization, which would have been released into the atmosphere anyway, leads to greenhouse gas emissions decrease by 0,6...1,9 m³/MW of CO₂ equivalent.

Keywords: biogas, landfill gas, solid household waste, solid municipal waste, combustion calculation, greenhouse effect, cofiring.

