

DOI: 10.18721/JEST.240101  
УДК 697.341

*Я.А. Владимиров<sup>1</sup>, Л.В. Зысин<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Институт интегративных исследований, Хайфа, Израиль

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ГАЗИФИКАЦИИ**

Описываются основные способы энергетической утилизации твердых коммунальных отходов. Приводится динамика изменения морфологического состава твердых коммунальных отходов Санкт-Петербурга начиная с 1975 года. Рассматриваются сводные результаты анализа теплотехнических характеристик и компонентного состава топливных газов, получаемых из твёрдых коммунальных отходов на основе различных вариантов современных технологий биоконверсии и термолиза. Описывается методика получения основных топливных характеристик этих газов и обсуждаются вопросы их сжигания в топочных устройствах и тепловых двигателях. Сделан вывод, что генераторный газ, как и биогаз, может применяться в различных топочных устройствах как промышленного, так и бытового назначения без их реконструкции. Определены направления дальнейшего использования топливных газов в энергетике и коммунальном хозяйстве.

БИОКОНВЕРСИЯ; ТЕРМОЛИЗ; КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ; ГОРЕЛКИ; СВАЛОЧНЫЙ ГАЗ; БИОГАЗ; ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ.

*Ссылка при цитировании:*

Я.А. Владимиров, Л.В. Зысин. Методические вопросы энергетического использования твёрдых коммунальных отходов и продуктов их газификации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101.

*Ya.A. Vladimirov<sup>1</sup>, L.V. Zyssin<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Integrative research institute, Haifa, Israel

## **METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENERGY UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND ITS GASIFICATION PRODUCTS**

We have described the main methods for energy utilization of municipal solid waste. The article contains the dynamics of morphological composition of municipal solid waste in St. Petersburg since 1975. We have summarized the results of the analysis of thermal characteristics of fuel gases obtained from municipal solid waste by different versions of modern technologies of bioconversion and thermolysis. We have described a method for

obtaining the basic fuel characteristics of these gases. Moreover, the study covers the main aspects of fuel gas combustion in boilers and heat engines. As a result, we have proved that fuel gases can be used in industrial and civil boilers without their reconstruction.

BIOCONVERSION; THERMOLYSIS; MUNICIPAL WASTE; TORCHES; GASIFIERS; LANDFILL GAS.

*Citation:*

Ya.A. Vladimirov, L.V. Zyssin, Methodological aspects of energy utilization of municipal solid waste and its gasification products, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 5–16, DOI: 10.18721/JEST.240101.

### Введение

В последней четверти XX века проблема утилизации городских отходов — будем называть их твёрдыми коммунальными отходами (ТКО)<sup>1</sup> — превратилась в экологическую и социальную задачу, от успешного решения которой в значительной степени зависит возможность развития и дальнейшего существования современных мегаполисов. Удельное количество отходов, образующееся на одного жителя, в настоящее время оценивается от 250 до 1000 кг в год и неуклонно растёт на 3–5 % ежегодно. В развитых странах имеются давние традиции и опыт сортировки отходов, технологии их переработки, которые непрерывно совершенствуются. Лидерами в области переработки ТКО являются Япония, где перерабатывается 75 % ТКО, США — 46 %, Швейцария — 53 % [1], Дания — 46,3 %, Нидерланды — 51,7 %, Германия — 66,1 %, Швеция — 48 %, Франция — 39,5 % [2]. Среди существующих методов переработки ТКО находят применение комплексная переработка с компостированием и складирование на полигонах с последующей земляной засыпкой. Однако господствующим является энергетическое использование; доля его в европейских странах приближается к 50 % и постепенно увеличивается по мере совершенствования технологий сжигания.

<sup>1</sup> Термин ТКО введён в 2014 г. федеральным законом №458-ФЗ от 29.12.2014 и, в отличие от ранее существовавшего понятия ТБО, включает отходы, образующиеся в нежилых помещениях и сходные по составу с образующимися в жилых помещениях.

В противоположность этому в России перерабатывается только около 1 % ТКО, остальные поступают на официальные и — по большей части — несанкционированные свалки, гниют, загрязняют почву и атмосферу выбросами CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S и др. Достаточно указать, что в регионе Санкт-Петербурга и Ленинградской области, где доля перерабатываемых ТКО едва превышает 25 %, наряду с шестьюдесятью санкционированными полигонами ТКО (иначе — свалками) существует несколько сотен несанкционированных. Создание развитой системы сбора, переработки и использования ТКО в нашей стране пока только ждёт своего решения. В этой связи рассмотрение вопросов рационального сжигания ТКО приобретает актуальность для теплоэнергетики.

**Цель представленной работы** — рассмотрение некоторых методических вопросов, связанных с оценкой перспектив использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации в теплоэнергетике.

### Исходные данные и методика работы

Для расчета свойств продуктов газификации ТКО необходимо изучить морфологический состав отходов, который имеет сезонные колебания и несколько различается по регионам. Однако достаточно объективное представление о нём дают данные по Санкт-Петербургу. Современный морфологический состав ТКО Санкт-Петербурга показан на рис. 1, а в табл. 1 приведены данные о динамике изменения морфологического состава ТКО за период с 1975 года.

Таблица 1

Динамика изменения морфологического состава, % (по массе), ТКО Санкт-Петербурга [3, 4]

Table 1

Dynamics of changes in Saint-Petersburg morphological composition of solid municipal waste (mass share) [3, 4]

Год	Бу-мага	Пище-вые отходы	Древе-сина	Ме-талл	Тек-стиль	Кожа, резина	Кости	Стекло	Камни, кера-мика	Пласт-масса	Прочее	Отсев менее 15 мм	Влажность	
													абсол.	относ.
1975	30	28,1	3,9	4,7	4,4	1,6	2,1	7,4	2,2	0,8	3	11,8	—	—
1986	22,5	23,3	5,2	3	7,7	4,2	2,3	6,8	3,6	5,3	3,7	12,4	25	51,7
1996	19,9	37	1,7	4,4	2,8	4,8	0,8	8,1	2,9	6,1	1,4	10,1	21,5	50,2
2000	15,6	34,9	0,8	4,6	3,8	1	—	13,7	4,6	11,3	0,5	9,2	21	48,6
2011	21,5	27,4	2,5	4,6	—	4,3	—	8,9	12,8	15,2	2,8	—	20,4	46,9

Теплоту сгорания, МДж/кг, сжигаемых компонент ТКО характеризуют следующие данные:

Бумага .....	20,3–14,5
Пищевые отходы .....	4,5–4,0
Древесина .....	20,2–14,5
Текстиль .....	19,8–14,0
Кожа, резина .....	31,1–25,9

Для определения потенциала использования ТКО в теплоэнергетике необходима предварительная оценка доли спроса на тепловую энергию, которая может быть удовлетворена за счет энергетической утилизации ТКО. Для проведения оценки использовались открытые данные об образовании ТКО из соответствующих утвержденных территориальных схем обращения с отходами, в том числе с ТКО. Сведения о потребности в тепловой энергии были получены из опубликованных схем теплоснабжения поселений.

По технологическим признакам сжигания способы энергетического использования ТКО можно разделить на две большие группы:

*одностадийное сжигание*, предусматривающее создание специальных топок, рассчитанных на использование несортированных ТКО и снабжённых устройствами для подавления вредных выбросов и сортировки негорючей части отходов. Такой способ, как правило, применяется в составе крупных мусоросжигательных заводов с целью утилизации ТКО и комбинированной выработки

тепловой и электрической энергии. Одностадийное сжигание применяется к сортированным либо неподготовленным отходам;

*двухстадийное сжигание*, предусматривающее на первой стадии преобразование органической части ТКО в смесь горючих газов, а на второй стадии – использование этих газов в различных типах энергетических устройств.

Технологии двухстадийного сжигания могут применяться как к несортированным ТКО, так и к предварительно обработанным, т. е. с удалением минеральных включений, и фракционированным (гранулы, брикеты, пеллеты и т. п.), что мало сказывается на качестве образующихся газов.

Значительно более важной является технология газификации; здесь можно выделить три основных процесса:

*метанное сбраживание (метанизация)* с помощью специальных культур микроорганизмов, которое наиболее успешно осуществляется на разнообразных органических отходах животного и растительного происхождения с влажностью не менее 75 %; в стадии разработки находится технология биоконверсии биомассы с влажностью менее 75 % – твердофазная метанизация осадков сточных вод и твердых бытовых отходов [5]. Конечный продукт здесь – биометан  $\text{CH}_4$ , использование которого в промышленных и бытовых энергетических устройствах не отличается от использования природного газа;

*термохимическая конверсия* (газогенерация, пиролиз), которая может быть реализована на натуральных ТКО, если минеральная доля в них не превышает 20–25 %; однако эта технология более эффективна на фракционированных ТКО. Существует ряд основных конструктивных типов газогенераторов: слоевые (прямой и обратный процесс); кипящего слоя (КС); циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Во всех случаях горючей составляющей *генераторного газа* является смесь  $H_2$  и  $CO$  (и незначительного количества газов углеводородного ряда) [5]. Вопросы очистки генераторного газа решаются значительно проще, чем при прямом сжигании ТКО. В зависимости от режимных параметров процесса (давление, температура), вида окислителя (воздух, пар и их смесь), способа подвода тепла (внутренний, через стенку) меняется соотношение горючих составляющих и балластных газов. В результате теплота сгорания генераторного газа варьируется в очень широких пределах: от 4,5 до 21 МДж/м<sup>3</sup>;

*анаэробное сбраживание* натуральных ТКО на полигонах, специально оборудованных для сбора *биогаза*. Механизм биоконверсии близок к вышеуказанной метанизации, только в данном случае необходимые для сбраживания микроорганизмы возникают естественным путём. Такой процесс является многолетним, он длится до 100 лет, причем наибольшее количество биогаза выделяется в первый год процесса и затем убывает по экспоненциальному закону. При этом состав биогаза нестабилен, что иллюстрирует табл. 2, заимствованная нами из автореферата диссертации А.В. Черемисина.\*

Из таблицы видно, что горючей составляющей биогаза с полигона является метан  $CH_4$ , только в данном случае в нём содержится определённое количество балласта

\* Черемисин А.В. Методика расчёта теплового режима искусственных геосистем на примере полигонов твёрдых бытовых отходов): Автореф. ... канд. дисс-ции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 16 с.

( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ), среди которого, к сожалению, есть вредные и токсичные вещества.

В дальнейшем анализе под биогазом будет подразумеваться газовая смесь, в состав которой входят:

*горючая составляющая* – метан ( $CH_4$ ) в количестве от 40 до 70 %;

*инертный газ* – двуокись углерода ( $CO_2$ ) в количестве от 60 до 30 %;

*примеси* – количество их незначительно, но в примесях имеется сероводород  $H_2S$ ;

*водяной пар* – максимальное содержание которого в смеси может составлять 7 %.

Для проведения тепловых расчетов и выбора энергетического оборудования необходимо знать: низшую теплоту сгорания  $Q_H^p$ ; плотность  $\rho$ ; теплоемкости при постоянном давлении ( $c_p$ ) и постоянном объёме ( $c_v$ ); показатель адиабаты  $k$ ; температуры сгорания сухого ( $T_{гор}$ ) и влажного ( $T_{гор}$ ) газа. Методическая основа расчёта указанных выше теплофизических параметров формулируется на основании [6, 7].

Определение высшей  $Q_B$  и низшей  $Q_H^p$  теплоты сгорания топлива осуществляется по формуле Д.И. Менделеева. При этом используются получаемые из эксперимента значения объёмных долей  $V$  (в %) соответствующих газов:  $CO_2$ ,  $H_2$ ;  $CH_4$ ;  $C_2H_4$ ;  $C_2H_6$ ;  $C_3H_8$ ;  $C_4H_{10}$  и др.

Средняя теплоемкость биогаза определяется по формуле

$$c_{см} = 0,01(c_{CH_4}V_{CH_4} + c_{CO_2}V_{CO_2} + c_{H_2O}V_{H_2O}).$$

Тогда температура горения смеси

$$T_{гор} = \frac{Q_{HВ}^p}{V_{см}c'_{см}},$$

где  $V_{см}$  – объём смеси, м<sup>3</sup>.

Теоретически необходимый расход воздуха для сжигания смеси, объёмы продуктов сгорания, водяных паров и избыточного воздуха определяются по известным зависимостям [7].

В расчетах принималась величина коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ .

Таблица 2

Компонентный состав биогаза

Table 2

Compositional analysis of biogas

Компоненты биогаза (хим. формулы)	Процентный состав (объёмные %)		Динамическая вязкость, мкП ( $10^{-7}$ кг/м·с)	Плотность компонентов, кг/м <sup>3</sup>
	Граничные значения	Наиболее характерные значения		
CH <sub>4</sub>	45–65	56	103	0,71682
CO <sub>2</sub>	25–45	35	138	1,97693
N <sub>2</sub>	0,3–19	8	166	1,25059
O <sub>2</sub>	0,1–4	0,8	192	1,42897
H <sub>2</sub>	0,01–2	0,1	84	0,089882
H <sub>2</sub> S	0,01–2	0,1	116,6	1,53843
Итого для биогаза	–	100	120,99(6)	1,20645

\* Динамические вязкости и плотности компонентов биогаза даны для  $t = 0$  °С.

При использовании газификации в качестве метода переработки отходов состав газа будет отличаться от получаемого при анаэробном сбраживании. Состав газа зависит от вида топлива и организации процесса газификации и, следовательно, может изменяться. Поэтому для каждого конкретного случая проводится свой расчет.

Например, средний состав, %, генераторного газа, получаемого в обратном процессе газификации при воздушном дутье: H<sub>2</sub> – 13,6; CO – 18,3; CH<sub>4</sub> – 1,2; CO<sub>2</sub> – 7,7; O<sub>2</sub> – 0,1; N<sub>2</sub> – 34,1; H<sub>2</sub>O – 25; смола – менее 0,5; H<sub>2</sub>S – менее 0,5; концентрация пыли – 1,5.

Следовательно, по сухой массе после очистки от смолы, H<sub>2</sub>S и пыли состав газа будет, %: H<sub>2</sub> – 18,1; CO – 24,4; CH<sub>4</sub> – 1,6; CO<sub>2</sub> – 10,3; O<sub>2</sub> – 0,2; N<sub>2</sub> – 45,4.

При другой конечной влажности состав генераторного газа рассчитывается по формуле

$$a = a_c \frac{100 - W}{100},$$

где  $a$  – концентрация данного компонента в генераторном газе, %;  $a_c$  – концентрация данного компонента в сухом генераторном газе, %;  $W$  – влажность генераторного газа, %.

Теоретический расход кислорода для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> генераторного газа составит  $V_{0\text{O}_2} = 0,24 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; воздуха, содержащего 21 % кислорода, –  $V_{0\text{в}} = 1,14 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

При изменении состава газа и состава дутья теоретический расход дутья для полного сжигания 1 м<sup>3</sup> газа рассчитывается по формуле

$$V_{0\text{д}} = \frac{100}{K} V_{0\text{O}_2},$$

где  $K$  – содержание кислорода в дутье, %.  $K = 21$  % при воздушном дутье;

$$V_{0\text{O}_2} = 0,5(V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}}) + 1,5V_{\text{H}_2\text{S}} + \Sigma((n + m) V_{\text{C}_n\text{H}_m} - V_{\text{O}_2})0,01,$$

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $V_{\text{CO}}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{S}}$ ,  $V_{\text{C}_n\text{H}_m}$ ,  $V_{\text{O}_2}$  – процентное содержание индивидуальных газов в составе генераторного газа, об. %.

Плотность генераторного газа принятого среднего состава при нормальных условиях  $\rho_0 = 1,09 \text{ кг/м}^3$ .

Низшая и высшая теплота сгорания генераторного газа определялась по формуле

$$Q_{\text{н(в)}} = 0,01(Q_{\text{н(в)H}_2} V_{\text{H}_2} + Q_{\text{н(в)CO}} V_{\text{CO}} + Q_{\text{н(в)H}_2\text{S}} V_{\text{H}_2\text{S}} + \Sigma Q_{\text{н(в)C}_n\text{H}_m} V_{\text{C}_n\text{H}_m}),$$

где  $Q_{\text{н(в)}}$  – низшая (высшая) теплота сгорания компонент, составляющих генераторный

газ, МДж/м<sup>3</sup>;  $V_{H_2}$ ,  $V_{CO}$ ,  $V_{H_2S}$ ,  $V_{C_{nH_m}}$  – содержание компонент генераторного газа, % [10].

Важной характеристикой процесса сжигания газообразного топлива является скорость  $u$  распространения пламени. Различают нормальную (ламинарную) скорость распространения пламени  $u_n$ , которая зависит от молекулярных характеристик смеси, и турбулентную скорость распространения пламени  $u_t$ , определяемую гидродинамическими характеристиками потока, т. е. в конечном счете конструкцией горелки. В технической литературе, например [8], имеются рекомендации по вычислению величины  $u_n$  для газовых смесей с содержанием инертных газов не более 5 %, а также рекомендации по учету влияния на  $u_n$  температуры и давления. При этом повышение начальной температуры газозооной смеси ведет к увеличению  $u_n$ , а увеличение давления – к снижению  $u_n$ . Увеличение давления сужает также пределы воспламеняемости смеси газов.

Влияние присутствия в смеси инертного газа  $CO_2$  на величину  $u_n$  может быть приближенно оценено с помощью эмпирической зависимости

$$u_{n6} = u_n (1 - 0,012 V_{CO_2}).$$

Однако в целом для определения оптимальных условий сжигания свалочного и генераторного газов целесообразна экспериментальная проверка указанных выше характеристик. Такие исследования относительно просто можно осуществить в лабораторных условиях, например на смеси природного газа с  $CO_2$ .

Практическое сжигание топлива осуществляется, как правило, при развитом турбулентном режиме течения газового потока [13] (исключение составляют только бытовые газовые горелки атмосферного типа). О сложном влиянии турбулентности на распространение пламени пока нет единого мнения. Исходя из разных моделей процесса величину турбулентной скорости распространения пламени  $u_t$  предлагается определять формулами

$$u_t / u_n = (1 + lw/a)^{1/2},$$

или

$$u_t / u_n = 1 + B(w/u_n)^{1/2},$$

где  $l$  – масштаб турбулентности;  $w$  – пульсационная скорость;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $B$  – константа, зависящая от физико-химических свойств топлива.

### Результаты расчётов и задачи экспериментального исследования

Расчеты по описанным выше методикам позволили получить следующие результаты.

По предварительной оценке за счет термической переработки ТКО можно удовлетворить от 2 до 7 % спроса населенного пункта на тепловую энергию. За счет термической утилизации ТКО могут быть решены не только задачи энергосбережения, но и экологические проблемы размещения отходов. Результаты оценки максимально возможной доли тепловой энергии, полученной при сжигании ТКО, в тепловом балансе ряда типичных населенных пунктов приведены в табл. 3.

Сводные результаты расчётов теплофизических свойств биогаза с указанным в табл. 2 диапазоном параметров представлены в табл. 4.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что наши результаты несколько расходятся с данными публикации [8], указывающими, что при сжигании в воздухе смеси  $2CH_4 + CO_2$  температура пламени составляет 1752 °С (процент горючего – 13,8). Вероятно, для подтверждения результатов потребуется экспериментальная проверка.

Важной характеристикой топлива служат концентрационные пределы его воспламеняемости. Концентрационные пределы воспламенения метана (горючая составляющая биогаза) в смеси с  $CO_2$  находятся в пределах от 6 до 30 % [9]. Сходные результаты дает аналогичная зависимость для смеси метана с инертным газом ( $N_2$ ): для такой смеси концентрационные пределы шире и составляют 6–42 % [8]. Таким образом можно полагать, что во всем принятом диапазоне изменения концентраций компонентов биогаза он будет воспламеняться.



Таблица 3

**Потенциал использования ТКО в качестве источника тепловой энергии  
в различных населенных пунктах России**

Table 3

**The potential of using solid municipal waste as a heatpower resource in different Russian settlements**

Наименование населенного пункта, %	Оценочная масса ТКО, т/год	Потенциальное количество теплоты ТКО, Гкал	Доля тепловой энергии, полученной из ТКО, в тепловой балансе, %
Петрозаводск	79387	53856	2,3
Екатеринбург	979238	664315	3,9
Няндама (Архангельская обл.)	6123	4154	3,3
Кировск (Ленинградская обл.)	12340	8371	4,3
Саратов	384682	260968	6,8
Санкт-Петербург	2062193	1398991	3,2

Таблица 4

**Теплофизические свойства биогаза**

Table 4

**Thermophysical properties of biogas**

Состав газовой смеси, об. %	Теплофизические параметры					
	$Q_H^p$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$c_v$ , кДж/(кг·К)	$k$	$T_{гор}$ , °С
CH <sub>4</sub> – 40, CO <sub>2</sub> – 60	14 344	1,476	1,073	0,8257	1,3	2225
CH <sub>4</sub> – 70, CO <sub>2</sub> – 30	25 102	1,098	1,4313	0,0954	1,3	2560
CH <sub>4</sub> – 33, CO <sub>2</sub> – 60, H <sub>2</sub> O – 7	11 834	1,48	1,067	0,8203	1,3	1702
CH <sub>4</sub> – 63, CO <sub>2</sub> – 30, H <sub>2</sub> O – 7	22 592	1,10	1,4245	1,0891	1,3	1968

Достоверные сведения о конкретной форме зависимости скорости распространения пламени при турбулентном режиме течения газового потока от скорости распространения пламени при ламинарном режиме течения газового потока  $u_T = f(u_{л0})$  в литературе отсутствуют. Поскольку режим турбулентного горения в конечном счете определяется формой топочного устройства и соотношением расходов первичного и вторичного воздуха, отработку оптимальных условий для сжигания биогаза целесообразно выполнять экспериментально на конкретных моделях. В ходе экспериментов следует установить оптимальные условия, обеспечивающие полное сгорание биогаза и приемлемый профиль температур на выходе из топочного устройства. Определение кинетических констант реакции горения, лучеиспускательной способности пламени и ряда других характеристик можно отложить на более поздний период.

В качестве примера реализации топочного устройства для биогаза считаем возможным ориентироваться на топки циклонного типа и прямоточные теплогенераторы с инжекционными горелками полного предварительного смешения. Преимущество последних заключается в том, что они могут работать без принудительной подачи воздуха с малыми коэффициентами избытка воздуха ( $\alpha = 1,02-1,08$ ) благодаря хорошему предварительному перемешиванию газа с воздухом. Промышленность выпускает инжекционные горелки нескольких типов, в том числе типа *B*, предназначенные для сжигания природного и коксового газов при работе на холодном воздухе, и типа *H*, предназначенные для работы на низкокалорийном газе также без подогрева воздуха. Давление газа, подаваемого к горелкам типа *B*, должно находиться в диапазоне 9,8–137,2 кПа, для горелки типа *H* – в диапазоне 1,96–17,64 кПа. Можно

также рассматривать применение ряда других типов горелочных устройств: без принудительной подачи воздуха и с принудительной подачей воздуха, со стационарными и вращающимися насадками и др.

Относительно низкая скорость горения биогаза, безусловно, вызовет удлинение факела и выход его за пределы топочного устройства. Как следствие, желательна (но, скорее всего, не обязательно) увеличение длины топки. Важно то, что проходные сечения топки при переводе её на биогаз могут быть сохранены без изменения. Последнее связано с тем обстоятельством, что (не будем вдаваться здесь в причины) расход дымовых газов с изменением теплоты сгорания топлива ( $Q_p$ ) при постоянном избытке воздуха ( $\alpha$ ) практически не меняется. Последнее иллюстрирует табл. 5, где приведены результаты расчетов для разных топлив при  $\alpha = 1,2$ . Из приведенных данных видно, что расход дымовых газов мало зависит от  $Q_p$ .

### Обсуждение результатов

Следует ожидать, что продукты сгорания генераторного газа и биогаза в экологическом отношении чище, чем продукты сгорания природного газа, благодаря следующим обстоятельствам:

при относительно более низкой температуре сгорания генераторного газа и биогаза будет образовываться меньше вредных окислов азота  $NO_2$ , дополнительное количество которых возникает при температурах выше  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ,

углекислый газ  $CO_2$  в продуктах сгорания биомассы согласно международной конвенции не участвует в изменении баланса углерода в земной атмосфере,

образование окислов серы  $SO_x$  можно исключить путем предварительной очистки генераторного газа и биогаза от сероводорода  $H_2S$ .

Наличие  $SO_x$  в продуктах сгорания нежелательно также в теплотехническом отношении, так как препятствует глубокой утилизации теплоты продуктов сгорания. При охлаждении продуктов сгорания ниже точки росы из окислов серы образуется серная кислота  $H_2SO_4$ , обуславливающая интенсивную коррозию конвективных поверхностей (скорость которой может достигать 1 мм в год). Поэтому в случае энергетического использования биогаза его целесообразно очистить от  $H_2S$ . Очистка от сероводорода природного газа, нефтепромысловых и доменных газов широко практикуется. Наибольшее распространение получил комбинированный способ, основанный на применении жидких и твердых поглотителей (метанол, амины, активированные угли, окись алюминия и др.). Если содержание  $H_2S$  в газе велико, то улавливающие его установки дополняют секциями для получения элементарной серы и серной кислоты. Однако при малых количествах  $H_2S$  такое производство оказывается нерентабельным. В целом можно констатировать, что по сравнению с прямым сжиганием газификация снижает суммарный объем вредных выбросов в атмосферу.

Таблица 5

Количество дымовых газов, образующихся при сгорании топлив с разной теплотой сгорания, при  $\alpha = 1,2$

Table 5

The amount of smoke fumes produced by combustion of fuels with different heat value ( $\alpha = 1,2$ )

Топливо	Теплота сгорания, МДж/кг	Расход, м <sup>3</sup> /с		
		топливо	воздух	дымовые газы
Природный газ	35,3	0,283	7,218	7,845
Мазут	40,6	0,0003	7,061	7,397
Генераторный газ	4,96	7,2	5,155	7,800



За счет уменьшения размера санитарно-защитной зоны установки термохимической конверсии ТКО могут быть расположены ближе к селитебным территориям – непосредственно к источнику образования ТКО и потребителю тепловой энергии. Таким образом, очевидна экономия на транспорте ТКО и тепловой энергии. Потребление тепловой энергии зависит от температуры наружного воздуха, соответственно для работы источника тепловой энергии на ТКО на выделенную обособленную зону необходимо создавать запас ТКО, хранящийся на территории источника. Возможен вариант организации работы на единую тепловую сеть с источником выработки тепловой энергии, работающим на традиционном то-

пливе [14]. Такое схемное решение позволит загружать источник термохимической конверсии ТКО по мере образования отходов, а пики потребления компенсировать за счет «традиционной» генерации. Как отмечалось выше (см. табл. 3), за счет энергетической утилизации ТКО возможно компенсировать от 2,5 до 7 % потребности города в тепловой энергии.

В табл. 6 приведено сопоставление состава и теплотехнических характеристик биометана, генераторного газа и биогаза с рядом наиболее распространенных газов, применяемых в качестве топлива. При этом для биогаза даны максимальная и минимальная калорийности согласно значениям, приведенным в табл. 2.

Таблица 6

## Сравнительные теплотехнические характеристики топливных газов

Table 6

## The comparison of biogas' thermophysical properties

Газ	Состав газа, объёмный, %							$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_n^p$ , МДж/м <sup>3</sup>
	Горючие газы				Инертные газы		O <sub>2</sub>		
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
Биометан [12]	–	–	95	3	–	1,5	–	–	36
Биогаз:									
высококалорийный	–	–	70	33	–	30	–	1,0981,48	25,10211,834
низкокалорийный	–	–	–	–	–	60	–	–	–
Полукоксовый [6]	23,5	6,5	51,5	4,5	7,0	5,5	1,5	0,764	24,65
Коксовый [6]	57	6,0	24,0	3,0	3,0	7,0	–	0,324	17,6
Сланцевый [6]	24,7	10,0	16,2	5,0	16,4	26,8	0,7	1,040	13,85
Генераторный газ*	18,1	24,4	1,6	–	10,3	45,4	0,2	1,09	4,5
Генераторный газ**	13,0	27,6	0,6	–	6,0	53,2	0,2	1,141	5,15
Генераторный газ***	37,6	39,2	–	–	3,02	19,9	–	0,52	8,25
Доменный [6]	3,0	30	–	–	9,0	58,0	–	1,283	4,10
Природный [6] (Коробовский)	–	–	81,5	14,8	–	3,2	0,5	0,901	41,45
Природный [6] (Игримский)	–	–	95,7	2,8	–	1,3	0,2	0,741	36,47

\* обращённый процесс газификации при воздушном дутье [10];

\*\* прямой процесс газификации при паровоздушном дутье [10];

\*\*\* аллотермический процесс газификации [12]

Приведенные данные показывают, что биогаз достаточно хорошо вписывается в группу среднекалорийных газов, таких, как полукоксовый, коксовый, сланцевый, широко применяемых в промышленной энергетике. По топливной составляющей биогаз наиболее близок к природному газу. По количеству инертного газа биогаз сопоставим с генераторным, получаемым на воздушном дутье.

Однако инертные составляющие в биогазе и генераторном газе разные. В первом случае двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), во втором – азот ( $\text{N}_2$ ). Разбавление горючих газов инертными (балластными) газами ухудшает их воспламеняемость. Вид инертного газа может существенно влиять на пределы воспламеняемости, причем для случая  $\text{CO}_2$  это влияние значительно сильнее, чем для  $\text{N}_2$  [9]. При минимально возможной концентрации в биогазе  $\text{CH}_4$  воспламенение биогаза проблематично, так как он находится в очень узком диапазоне концентраций воздуха. В подобных случаях достаточно распространенным в технике приемом, позволяющим улучшить воспламеняемость, является присадка высококалорийного газа от постороннего источника (природный газ, пропан, бутан и др.).

Приведенные в табл. 5 данные позволяют сделать вывод о том, что генераторный газ, как и биогаз, может применяться в различных топочных устройствах как промышленного (паровые и водогрейные котлы, технологические печи, сушильные установки, теплогенераторы, обогревательные устройства и др.), так и бытового (отопительные печи, водогрейные устройства и т. п.) назначения без их реконструкции. Для эффективного и надежного сжигания генераторного газа и оптимизации топочных устройств целесообразно провести исследования скорости распространения фронта горения, длины факела и полноты сгорания в горелках различного типа при различных значениях состава биогаза и расхода дутьевого воздуха. Применение газа в быту по условиям техники безопасности требует одорации (придания запаха).

## Выводы

На основании приведенного выше анализа могут быть сделаны следующие выводы:

1. Энергетическое использование ТКО в настоящее время в экономически развитых странах рассматривается как один из наиболее эффективных в экономическом отношении путей утилизации ТКО.

2. Среди технологий энергетического использования ТКО возможны как прямое сжигание в котлах со специально оборудованными топочными устройствами, так и двухстадийная переработка с промежуточной стадией получения из ТКО горючих газов с последующим их использованием в традиционных энергетических установках.

3. Технология прямого сжигания предпочтительна для крупных энергетических комплексов, типа ТЭЦ или ТЭС, и может успешно реализовываться как на натуральных отходах, так и на прошедших предварительную обработку.

4. Существует ряд технологий, в разной степени освоенных, для получения из ТКО горючих газов. Теплотехнические свойства указанных газов допускают их эффективное использование в топках и камерах сгорания традиционных энергетических устройств при минимальной реконструкции горелочных устройств.

5. Устройства термохимической конверсии ТКО могут иметь относительно малую мощность и располагаться близко к местам их образования. В этой связи возможно и целесообразно использование ТКО в системах централизованного теплоснабжения в качестве дополнительного энергетического ресурса.

6. Использование ТКО в системах централизованного теплоснабжения позволяет компенсировать от 2,5 до 7 % потребности населенного пункта в тепловой энергии.

7. Энергетические установки, использующие ТКО, целесообразно рассматривать при сравнительном анализе вариантов модернизации систем централизованного теплоснабжения и разработке планов перспективного развития подобных систем.



8. Важным фактором, определяющим успехи энергетически выгодной утилизации ТКО, должно стать решение комплекса организационных, правовых, со-

циальных и экономических вопросов, связанных с отдельным сбором отходов, т. е. с сортировкой их на стадии образования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малышевский А.Ф.** Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России [Электр. ресурс]. М., 2012, 47 с. URL: [http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad\\_po\\_tbo.pdf](http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf). (дата обращения 25.10.2017).
2. База данных Eurostat [Электр. ресурс]. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (дата обращения 25.10.2017).
3. **Козлов Г.В., Ивахнюк Г.К.** Морфологический состав твердых коммунальных отходов по регионам мира в XX и начале XXI века (обзор) // Известия СПбТИ(ТУ). 2014. № 24. С. 58–66.
4. **Колычев Н.А.** Анализ динамики объема твердых коммунальных отходов и их компонентный состав // Рециклинг отходов. 2015. № 5–6 (50–60). С. 73–79.
5. Биомасса как источник энергии / Под ред. С. Суффера, О. Заборски / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 376 с.
6. **Соколов Б.А.** Газовое топливо и газовое оборудование котельных. М.: Академия, 2007. 64 с.
7. **Канторович Б.В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 601 с.
8. **Иссерлин А.С.** Основы сжигания газового топлива. Л.: Недра, 1987. 356 с.
9. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Изд-во иностр. литературы, 1948. 446 с.
10. **Сергеев В.В.** Газификация растительной биомассы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 242 с.
11. **Панцхава Е.С., Пожарнов В.А., Зысин Л.В. [и др.].** Преобразование энергии биомассы. Опыт России // Теплоэнергетика. 1996. № 5. С. 33–38.
12. **Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimcev A.A.** Arc Gasification of Biomass: Example of Wood Residue // High temperature. 2011. Vol. 49. No 2. P. 244–248.
13. **Sergeev V.V., Vladimirov Y.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.** Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization // Construction of unique buildings and structures. 2016. No 12. P. 85–93.
14. **Плахута А.Д.** Современный подход к выбору оптимального источника теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 2. С. 33–38.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВЛАДИМИРОВ Ярослав Александрович** — заместитель заведующего лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: [vladimirov@nil-teplo.ru](mailto:vladimirov@nil-teplo.ru)

**ЗЫСИН Леонид Владимирович** — доктор технических наук научный сотрудник Института интегративных исследований, Хайфа, Израиль

E-mail: [lv\\_zyssin@mail.ru](mailto:lv_zyssin@mail.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 21.11.2017

#### REFERENCES

- [1] **Malyshevskii A.F.** Obosnovanie vybora optimal'nogo sposoba obezvrezhivaniia tverdykh bytovykh otkhodov zhilogo fonda v gorodakh Rossii [Elektr. resurs]. M., 2012. 47 s. URL: [http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad\\_po\\_tbo.pdf](http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf). (data obrashcheniia 25.10.2017). (rus.)
- [2] Baza dannykh Eurostat [Elektr. resurs]. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (data obrashcheniia 25.10.2017).
- [3] **Kozlov G.V., Ivakhniuk G.K.** Morfologicheskii sostav tverdykh kommunal'nykh otkhodov po regionam mira v KhKh i nachale XXI veka (obzor). *Izvestiia SPbTI(TU)*. 2014. № 24. S. 58–66. (rus.)
- [4] **Kolychev N.A.** Analiz dinamiki ob"ema tverdykh kommunal'nykh otkhodov i ikh komponentnyi sostav. *Retcikling otkhodov*. 2015. № 5–6 (50–60). S. 73–79. (rus.)
- [5] Biomassa kak istochnik energii / Pod red. S. Coufera, O. Zaborski / Per. s angl. M.: Mir, 1985. 376 s. (rus.)

- [6] **Sokolov B.A.** Gazovoe toplivo i gazovoe oborudovanie kotel'nykh. M.: Akademiia, 2007. 64 s. (rus.)
- [7] **Kantorovich B.V.** Osnovy teorii gorenii i gazifikatsii tverdogo topliva. M.: Izd-vo AN SSSR, 1958. 601 s. (rus.)
- [8] **Isserlin A.S.** Osnovy szhiganiia gazovogo topliva. L.: Nedra, 1987. 356 s. (rus.)
- [9] **L'iuiss B., El'be G.** Gorenii, plamia i vzryvy v gazakh. M.: Izd-vo inostr. literatury, 1948. 446 s. (rus.)
- [10] **Sergeev V.V.** Gazifikatsiia rastitel'noi biomassy. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016. 242 s. (rus.)
- [11] **Pantskhava E.S., Pozharnov V.A., Zysin L.V. [i dr.]**. Preobrazovanie energii biomassy. Opyt Rossii. *Teploenergetika*. 1996. № 5. S. 33–38. (rus.)
- [12] **Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimcev A.A.** Arc Gasification of Biomass: Example of Wood Residue. *High temperature*. 2011. Vol. 49. No 2. P. 244–248.
- [13] **Sergeev V.V., Vladimirov Y.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.** Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization. *Construction of unique buildings and structures*. 2016. № 12. S. 85–93.
- [14] **Plakhuta A.D.** Sovremennyi podkhod k vyboru optimal'nogo istochnika teplosnabzheniia. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2015. № 2. S. 33–38. (rus.)

#### AUTHORS

**VLADIMIROV Yaroslav A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: vladimirov@nil-teplo.ru

**ZYSSIN Leonid V.** – *Integrative research institute, Haifa, Izrael*

E-mail: lv\_zyssin@mail.ru

Received: 21.11.2017