

УДК 697.341

Я. А. Владимиров¹, Л. В. Зысин²

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

– Институт интегративных исследований, Хайфа, Израиль

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ГАЗИФИКАЦИИ

Приводятся сводные результаты анализа теплотехнических характеристик 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 в тепловых двигателях.

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

I. A. Vladimirov, L. V. Zyssin

METHODICAL QUESTIONS POWER USE OF A SOLID MUNICIPAL WASTE AND PRODUCTS OF THEIR GASIFICATION

Summary results of the analysis of heatprincipal specifications of the fuel gases received from a solid municipal waste on the basis of various options of the modern technologies of bioconversion and a thermolysis are given. The technique of obtaining the main fuel characteristics of these gases is described, and issues of their combustion in furnace devices and in heat engines are discussed. Some thermal schemes, perspective for utilization of a solid municipal waste, in particular, in the systems of the bivalent centralized heat supply are offered.

BIOCONVERSION, THERMOLYSIS, MUNICIPAL WASTAGE, TORCHES, GAS ENGINES, GAS TURBINES

В последней четверти XX века проблема утилизации городских отходов –

б
у
д
е
м

н
а
з
ы
в
а
т
ь

В противоположность этому в России перерабатывается только около 1% ТКО, остальное поступает на официальные, а по большей части несанкционированные свалки, гниют, загрязняют почву и атмосферу выбросами CO₂, CH₄, H₂S и др. Достаточно указать, что в регионе С.-Петербурга, где доля перерабатываемых ТКО едва переваливает за 25%, наряду с 60-ю санкционированными полигонами ТКО (иначе – свалками) существует несколько сотен несанкционированных. Только в Москве и Санкт-Петербурге 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 для теплоэнергетики актуальность.

м

и Морфологический состав ТКО имеет сезонные колебания и несколько отличается по регионам, однако, достаточно объективное представление о нём дают данные по С.-Петербургу, приведенные в таблице 1. В таблице приведена динамика изменения морфологического состава ТКО, начиная с 1975 года. Из таблицы 1 видно, что органическая часть ТКО составляет около 70-75%. Современный морфологический состав ТКО приведен на рис. 1.

Таблица 1

у
н

Динамика изменения морфологического состава ТКО (по массе) Санкт-Петербурга

Наименование компонента	1975	1986	1996	2000	2011	Теплота сгорания, МДЖ/кг
Бумага	30	22,5	19,9	15,6	21,5	20,3-14,5
Пищевые отходы	28,1	23,3	37	34,9	27,4	4,5-4,0

м

и

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

т

х

о

д

а

Наименование компонента	1975	1986	1996	2000	2011	Теплота сгорания, МДЖ/кг
Древесина	3,9	5,2	1,7	0,8	2,5	20,2-14,5
Металл	4,7	3	4,4	4,6	4,6	
Текстиль	4,4	7,7	2,8	3,8		19,8-14,0
Кожа, резина	1,6	4,2	4,8	1	4,3	31,1-25,8
Кости	2,1	2,3	0,8	-	-	
Стекло	7,4	6,8	8,1	13,7	8,9	
Камни, керамика	2,2	3,6	2,9	4,6	12,8	
Пластмасса	0,8	5,3	6,1	11,3	15,2	
Прочее	3	3,7	1,4	0,5	2,8	
Отсев менее 15 мм	11,8	12,4	10,1	9,2	-	
Влажность,%						
Абсолютная		25	21,5	21	20,4	
относительная		51,7	50,2	48,6	46,9	

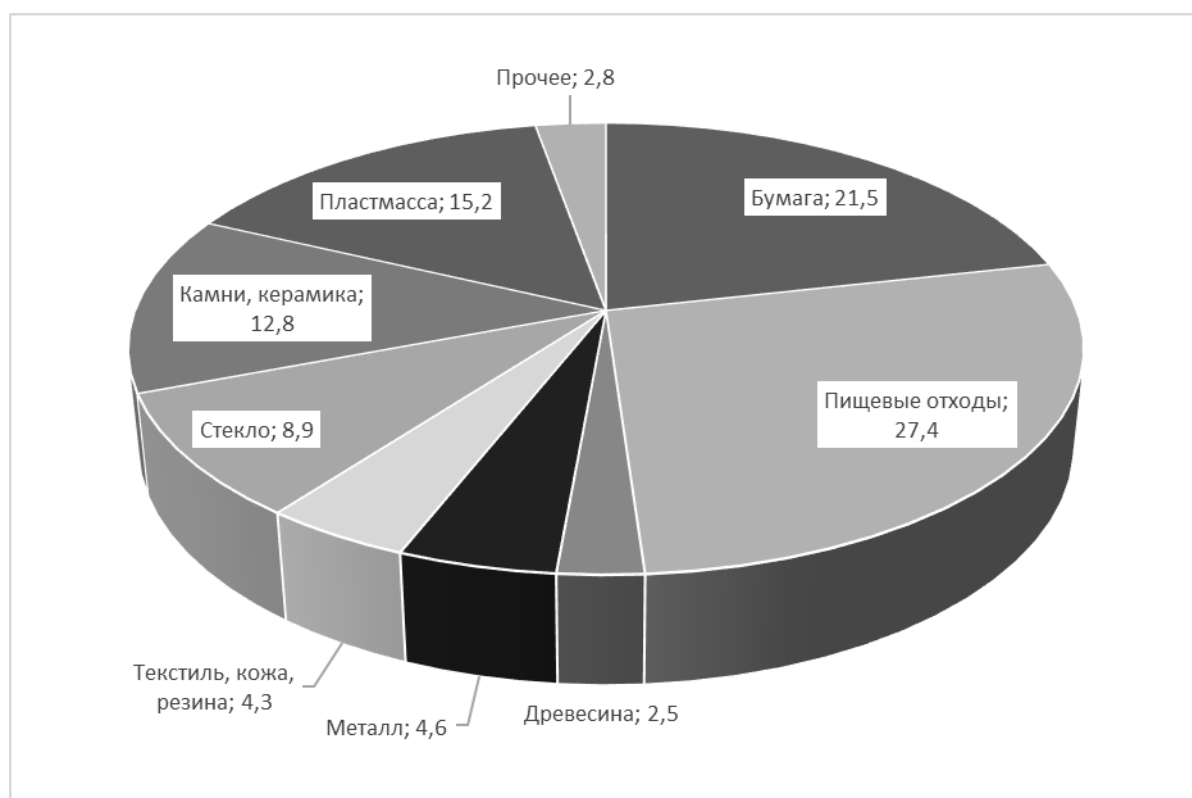


Рис. 1. Морфологический состав ТКО Санкт-Петербурга, % [10]

По нашей предварительной оценке, за счет термической переработки ТКО можно удовлетворить от 2 до 7% спроса населенного пункта на тепловую энергию. Для проведения оценки использовались открытые данные об образовании ТКО из соответствующих утвержденных территориальных схем обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами. Сведения о потребности в тепловой энергии были получены из опубликованных

схем теплоснабжения поселений. 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 из ТКО, в тепловом балансе населенного пункта приведены в таблице 2.

Таблица 2.

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

Наименование Населенного пункта	Оценочная масса ТКО, т/год	Потенциальное количество теплоты ТКО, Гкал	Доля тепловой энергии, полученной из ТКО, в тепловой балансе, %
Петрозаводск			
Екатеринбург			
Няндома (Архангельская обл.)			
Кировск (Ленинградская обл.)			
Саратов			
Санкт-Петербург			

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

одностадийное сжигание, предусматривающее создание специальных топочных устройств, рассчитанных на использование не сортированных ТКО и снабжённых устройствами для подавления вредных выбросов и сортировки негорючей части отходов. 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.

двух стадийное 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 двух стадийного сжигания могут осуществляться как на несортированных ТКО, так и на предварительно обработанных с удалением минеральных включений и фракционированных (гранулирование, брикетирование, пеллетирование и т. п.), что мало сказывается на качестве образующихся газов. Значительно более важным является технология газификации, здесь можно выделить три основных процесса:

- метанное сбраживание (метанизация) с помощью специальных культур микроорганизмов – 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 [3]. Конечным продуктом здесь является биометан CH_4 , использование которого в промышленных и бытовых энергетических устройствах не отличается от использования природного газа;

- термохимическая конверсия (газогенерация, пиролиз) может быть реализована на натуральных ТКО, так и на фракционированных (такая технология наиболее эффективна). Существует ряд типов газогенераторов, отличающихся свойствами, основными при этом являются: слоевые (прямого и обращённого процессов), 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). [3]. 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/м³.

- анаэробное сбраживание натуральных ТКО на полигонах, специально оборудованных для сбора *биогаза*. Механизм биоконверсии в данном случае близок выше указанной 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 не стабилен, что иллюстрирует таблица 3, заимствованная нами из [4].

.Таблица 3

Компонентный состав биогаза по [4]

Компоненты биогаза (хим. формулы)	Процентный состав (объёмные %)		Динамическая вязкость, мкП ((10 ⁻⁷) кг/м·с)	Плотность компонентов, кг/м ³
	граничные значения	наиболее характерные значения		
CH_4				
CO_2				
S				
Итого для биогаза				

- динамические вязкости и плотности компонентов биогаза даны для $t=0^\circ\text{C}$.

Из таблицы видно, что горючей составляющей биогаза с полигона является, так же как и при метанизации, метан CH_4 , только в данном случае в нём содержится определённое количества балласта: 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%.

Определим следующие характеристики газа, указанного выше состава, необходимые для проведения тепловых расчетов и выбора энергетического оборудования: низшую теплоту сгорания Q_n^p ; плотность ρ ; теплоемкостей при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v ; показателя адиабаты k ; температуры сгорания сухого $T_{\text{гор}}$ и влажного газа $T_{\text{гор}}$. Методическая основа расчёта указанных выше теплофизических параметров формулировалась на основании [5 и 6].

1. Определение теплоты сгорания топлива.

Для определения высшей Q_v и низшей Q_n^p теплотворности топлива используется формулы Д.И. Менделеева. Состав газа выражается в процентах по объему, подсчет ведется по следующим формулам:

$$Q_v = 126,4\text{CO} + 127,8\text{H}_2 + 397,8\text{CH}_4 + 630,6\text{C}_2\text{H}_4 + 699,7\text{C}_2\text{H}_6 + 972,2\text{C}_3\text{H}_8 + 1285,9\text{C}_4\text{H}_{10} \text{ (кДж/м}^3\text{)},$$

$$Q_n^p = 126,4\text{CO} + 107,8\text{H}_2 + 358,6\text{CH}_4 + 591,2\text{C}_2\text{H}_4 + 638,1\text{C}_2\text{H}_6 + 913,4\text{C}_3\text{H}_8 + 1187,6\text{C}_4\text{H}_{10} \text{ (кДж/м}^3\text{)},$$

где CO , H_2 ; CH_4 ; C_2H_4 ; C_2H_6 ; C_3H_8 ; C_4H_{10} – объемные доли соответствующих газов в смеси, %.

2. Средняя теплоемкость смеси определяется по формуле :

$$c = 0,0 (c_{\text{C}_4} \cdot \text{C}_{\text{H}_4} + c_{\text{C}_2} \cdot \text{C}_{\text{O}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{H}_2\text{O})$$

3. Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты):

$$k = c_p / c_v.$$

4. Температура горения смеси

$$T_{\text{горения}} = \frac{Q_n^p + h_{\text{см}} + h_v}{V_{\text{см}} \cdot c'_{\text{см}}}$$

или в развернутом виде:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_n^p + h_c + h_{\text{MB}}}{V_{\text{C}_2} \cdot c'_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot c'_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c'_{\text{H}_2\text{O}} + V_v \cdot c'_v}$$

где $h_{\text{см}}$ и h_v - теплота смеси и воздуха соответственно, кДж/кг ., величинами которых при нормальных условиях можем пренебречь.

4.1. Теоретически необходимый расход воздуха для сжигания смеси, $\text{м}^3/\text{м}^3$ [15]:

$$V_0 = 0,0476(0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \sum(m + n/4)\text{C}_m\text{H}_n + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2).$$

4.2. Объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$ определяется формулой:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01(\text{CO} + \text{CH}_4 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2).$$

4.3. Объем азота в теоретически необходимом воздухе:

$$V_{0(\text{N}_2)} = 0,79V_0 + \text{N}_2/100, \text{ м}^3/\text{м}.$$

4.4. Объем избыточного воздуха:

$$\Delta V_{\text{в}} = (\alpha_{\text{в}} - 1)V_0, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

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

4.5. Объем водяных паров.

Массовая доля воды во влажном газе, %:

$$W_{\text{г}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{H}_2\text{O} / (\rho_{\text{CO}_2} \cdot \text{CO}_2 + \rho_{\text{CH}_4} \cdot \text{CH}_4 + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{H}_2\text{O}).$$

Тогда объем водяных паров:

$$V_{\text{в.п.}} = 0,01(\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \sum n/2(\text{C}_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + 0,124W_{\text{г}}) + 0,016V_0 \cdot \alpha_{\text{в}}).$$

Сводные результаты расчётов теплофизических свойств биогаза в указанном выше диапазоне параметров представлены в таблице 4.

Таблица 4

Теплофизические свойства биогаза

Состав газовой смеси	Теплофизические параметры					
	$Q_{\text{н}}^P$	ρ	c_p	c_v	k	$T_{\text{горения}}$
	кДж/м ³	кг/м ³	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)	-	°С
CH ₄ - 40%, CO ₂ - 60%	14 344	1,476	1,073	0,8257	1,3	2225
CH ₄ - 70%, CO ₂ - 30%	25 102	1,098	1,4313	0,0954	1,3	2560
CH ₄ - 33%, CO ₂ - 60%, H ₂ O - 7%	11 834	1,48	1,067	0,8203	1,3	1702
CH ₄ - 63%, CO ₂ - 30%, H ₂ O - 7%	22 592	1,10	1,4245	1,0891	1,3	1968

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что наши результаты несколько расходятся с литературными данными [7], указывающими, что при сжигании в воздухе смеси $2\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 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 CO₂ находятся в пределах от 6 до 30% [8]. Там же для сравнения дана аналогичная зависимость для смеси метана с инертным газом (N₂), для такой смеси концентрационные пределы шире и составляют 6-42% [7]. Во всем принятом диапазоне изменения концентраций компонентов биогаза он будет воспламеняться.

При использовании газификации в качестве метода переработки отходов состав получаемого газа будет отличаться от газа, 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_2 – 13,6%; CO – 18,3%; CH_4 – 1,2; CO_2 – 7,7; O_2 – 0,1; N_2 – 34,1; H_2O – 25; смола – менее 0,5; H_2S – менее 0,5; концентрация пыли – 1,5.

Следовательно, по сухой массе после очистки от смолы, H_2S и пыли состав газ будет, %: H_2 – 18,1%; CO – 24,4%; CH_4 – 1,6; CO_2 – 10,3; O_2 – 0,2; N_2 – 45,4.

При другой конечной влажности состав генераторного газа рассчитывается по формуле:

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

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 м³ генераторного газа составит – $V_{0,O_2} = 0,24$ м³/м³, воздуха при содержании 21% кислорода – $V_{0,B} = 1,14$ м³/м³.

При изменении состава газа и состава дутья, теоретический расход дутья для полного сжигания 1 м³ газа рассчитывается по формуле:

$$V_{0,d} = \frac{100}{K} \cdot V_{0,O_2}$$

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

$$V_{0,O_2} = 0,5 \cdot (H_2O + CO) + 1,5 \cdot H_2S + \sum((n + m) \cdot C_nH_m - O_2) \cdot 0,01,$$

где H_2O , CO , H_2S , C_nH_m , O_2 – процентное содержание индивидуальных газов в составе генераторного газа, об.%;

Плотность генераторного газа принятого среднего состава при нормальных условиях $\rho_0 = 1,09$ кг/м³.

Низшая и высшая теплота сгорания генераторного газа определялась по формуле:

$$Q_{H(B)} = 0,01 \cdot (Q_{H(B)H_2} \cdot H_2 + Q_{H(B)CO} \cdot CO + Q_{H(B)H_2S} \cdot H_2S + \sum Q_{H(B)C_nH_m} \cdot C_nH_m)$$

где $Q_{H(B)}$ – низшая (высшая) теплота сгорания компонент, составляющих генераторный газ, (МДж/м³); H_2 , CO , H_2S , C_nH_m – содержание компонент генераторного газа, % [11].

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°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 не желательно 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 . Методы очистки от сероводорода природного газа, нефтепромысловых и доменных газов широко практикуются. Наибольшее распространение получил комбинированный способ, основанный на применении жидких и твердых поглотителей (метанола, аминов, активированных углей, окиси алюминия и др.). Если содержание H_2S в газе велико, то улавливающие его установки дополняют секциями получения элементарной серы и серной кислоты. Однако при малых количествах H_2S , такое производство оказывается не рентабельным. В отличие от прямого сжигания ТКО, с помощью процесса газификации может быть снижен объем вредных выбросов в атмосферу. За счет уменьшения размера санитарно-защитной зоны, установки термохимической конверсии ТКО могут быть расположены ближе к жилым территориям – непосредственно 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. Также возможен вариант организации работы на единую тепловую сеть с источником выработки тепловой энергии, работающим на традиционном топливе. Такое схемное решение позволит загружать источник термохимической

конверсии ТКО по мере образования отходов. Пики потребления компенсировать за счет «традиционной» генерации. Из таблицы 2 следует, что за счет энергетической утилизации ТКО возможно компенсировать от 2,5 до 7% потребности города в тепловой энергии.

В таблице 5 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 таблице 4.

Таблица 5

Сравнительные теплотехнические характеристики топливных газов

Газ	Состав газа, объёмный, %						ρ , кг/м ³	Q_H^P , МДж/ м ³	
	Горючие газы				Инертные газы				O ₂
	H ₂	CO	CH ₄	C _n H _m	CO ₂	N ₂			
Биометан [2]									
Биогаз:[4]									
высококалорийный			70	-	30	-	-	1,098	25,102
низкокалорийный			33	-	60	-	-	1,48	11,834
Полукоксовый [5]	23,5	6,5	51,5	4,5	7,0	5,5	1,5	0,764	24,65
Коксовый [5]	57	6,0	24,0	3,0	3,0	7,0	-	0,324	17,6
Сланцевый [5]	24,7	10,0	16,2	5,0	16,4	26,8	0,7	1,040	13,85
Генераторный газ*									4
Генераторный газ**	13,0	27,6	0,6	-	6,0	53,2	0,2	1,141	5,15
Генераторный газ***									
Доменный [5]	3,0	30	-	-	9,0	58,0	-	1,283	4,10
Природный [5] (Коробовский)	-	-	81,5	14,8	-	3,2	0,5	0,901	41,45
Природный [5] (Игримский)	-	-	95,7	2,8	-	1,3	0,2	0,741	36,47

*- обращённый процесс газификации при воздушном дутье [11];

** - прямой процесс газификации при паровоздушном дутье [11];

***- аллотермический процесс газификации [12]

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

Однако, инертные газы в биогазе и генераторном газе разные. В первом случае двуокись углерода (CO₂), во втором – азот (N₂). Разбавление горючих газов инертными (балластными) газами ухудшает их воспламеняемость. Вид инертного газа может существенно влиять на пределы воспламеняемости, причем для случая

CO₂ это влияние значительно сильнее, чем для N₂ [8]. При минимально возможной концентрации в биогазе CH₄, воспламенение биогаза проблематично, так как 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.).

Важной характеристикой процесса сжигания газообразного топлива является скорость распространения пламени u . Различают нормальную (ламинарную) скорость распространения пламени u_n , которая зависит от молекулярных характеристик смеси, и турбулентную u_t – определяемую гидродинамическими характеристиками потока, т.е. в конечном счете конструкцией горелки. В технической литературе, например [7, 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 газозооушной смеси ведет к увеличению u_n , а при увеличении давления – снижается. Увеличение давления сужает также пределы воспламеняемости смеси газов.

Влияние на величину u_n присутствия в смеси инертного газа CO₂ может быть приближенно оценено с помощью эмпирической зависимости

$$u_{n0} = u_n (1 - 0,012 CO_2)$$

Однако, в целом для определения оптимальных условий сжигания свалочного и генераторного газов представляется целесообразной экспериментальная проверка указанных выше характеристик. Такие исследования могут проводиться в лабораторных условиях, например, на смеси природного газа с CO₂ и не вызовут серьезных экспериментальных трудностей.

Практическое сжигание топлива осуществляется, как правило, при развитом турбулентном режиме течения газового потока (исключение составляют только бытовые газовые горелки атмосферного типа). Влияние турбулентности на распространение очень сложно, и в данном вопросе 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. Достоверные сведения о конкретной форме зависимости $u_T = f(u_{n0})$ в литературе отсутствуют. Поскольку режим турбулентного горения в конечном счете определяется конкретной 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. Определение кинетических констант реакции горения, лучеиспускательной способностью пламени и ряда других характеристик можно отложить на более поздний период.

В качестве примера реализации топочного устройства для биогаза представляется 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 работе на низкокалорийном газе также без подогрева воздуха. Давление газа, подаваемого к горелкам, для типа *B* должно находиться в диапазоне 9,8-137,2 *кПа*, для 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, желательно (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 вдаваясь здесь в причины) расход дымовых газов с изменением теплоты сгорания топлива (Q_p) при постоянном избытке воздуха (α) практически не меняется. Последнее иллюстрируется таблицей 7, где приведены результаты расчетов для разных топлив при $\alpha=1,2$. Из приведенных данных видно, что расход дымовых газов мало зависит от Q_p .

Таблица 7.

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

Параметр	Природный газ	Мазут	Генераторный газ
Теплота сгорания Q_n^p , МДж/кг	35,3	40,6	4,96
Расход топлива, m^3/c	0	0	7
Расход воздуха, m^3/c	7	7	5
Расход дымовых газов, m^3/c	7	7	7

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что генераторный газ, также 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 проведение исследований 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). В этой связи для бытового применения биогаза, возможно, не имеет смысла производить его очистку от сероводорода.

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.
5. Устройства термохимической конверсии ТКО могут иметь малую мощность и располагаться близко к местам их образования. В этой связи возникает возможность и целесообразность использования 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 фактором должно стать решение комплекса организационных, правовых, социальных и экономических вопросов,

связанных с отдельным сбором отходов, иначе – сортировки их на стадии образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малышевский А.Ф.** Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России, М, 2012, 47 с. URL: http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf.
- 1а. База данных Eurostat URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
2. **Панцхава Е.С., Пожарнов В.А., Зысин Л.В. и др.** Преобразование энергии биомассы. Опыт России. – Теплоэнергетика, 1996, № 5. С. 33-38.
3. **Биомасса как источник энергии** / Под ред. С. Соуфера, О. Заборски // (пер. с англ.). М: Мир, 1985, 376 с.
4. **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.
5. **Промышленная теплоэнергетика и теплотехника** / Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983, 551с.
6. **Справочник лесохимика** / Под ред. А.М. Чащина. М.: Лесная промышленность, 1974, 374 с.
7. **Иссерлин А.С.** Основы сжигания газового топлива. Л.: Недра, 1987. 356 с.
8. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. М.: ИЛ, 1948, 446 с.
9. **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
10. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 29.05.2012 №524 «Об утверждении региональной целевой программы по обращению с твердыми бытовыми отходами в Санкт-Петербурге на период 2012-2020 годов.
11. **Сергеев В.В.** Газификация растительной биомассы. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016. -242 с.
12. **Arc Gasification of Biomass: Example of Wood Residue.** A.N. Brattsev, V.A. Kuznetsov, V.E. Popov, A.A. Ufimcev – High temperature., 2011, vol. 49, № 2, pp. 244-248.