УДК 662.767.2:620.92 DOI: 10.34031/es.2021.1.009

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СВАЛОЧНОГО ГАЗА

Трубаев П.А.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Целью работы являлось сравнение потенциала образования биогаза на полигонах ТКО, определенного по наиболее часто используемым методикам, и определение энергетического потенциала свалочного газа в энергосистеме страны при условии его полного использования для выработки электроэнергии. На основе уравнения химической реакции образования биогаза предложены уравнения для расчета удельного выхода компонентов биогаза из 1 кг отходов и их долей в объемных процентах. Расчеты по предложенным формулам показали, что выход биогаза из тонны отходов для российских ТКО, состав которых принят по разным источникам, значительно изменяется, от 312 до 433 м³. Состав биогаза изменяется мало, и теоретическое содержание метана в нем составляет от 53% до 57%. Выход и состав биогаза был оценен по уравнению Табасарана-Реттенбергера, моделям LandGEM, DOD (IPCC), CLEEN и по российским нормативным методикам. Средний общий выход биогаза составил 195 м³/т отходов при коэффициенте вариации 38%, средний выход метана – 95 м³/т отходов при коэффициенте вариации 46%, а средняя теплота сгорания биогаза, отнесенная к 1 тонне отходов, из которых он образовался, составила 3 400 МДж/т отходов при коэффициенте вариации 44%. При КПД преобразования в электроэнергию 39% свалочный газ из 1 т отходов позволяет выработать 368 кВт·ч электроэнергии. Общий объем твердых коммунальных отходов в России при условии полного сбора и использования биогаза позволяет выработать 22,1 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет около 2% от общего энергопотребления в стране. Для ряда стран энергетический потенциал свалочного газа составил от 0,05% (Китай) до 4,5% (Испания). Таким образом свалочный газ является существенным источником электроэнергии в общем энергобалансе.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, потенциал образования, энергетический потенциал, полигон ТКО.

EVALUATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF LANDFILL GAS

Pavel Trubaev

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

Abstract

The purpose of the work was to compare the potential of biogas generation at MSW landfills, determined by the most commonly used methods, and to determine the energy potential of landfill gas in the country's energy system, provided that it is fully used to generate electricity. Based on the equation of the chemical reaction of biogas formation, equations are proposed for calculating the specific yield of biogas components from 1 kg of waste and their shares in volume percent. Calculations according to the proposed formulas showed that the yield of biogas from a ton of waste for Russian MSW, the composition of which is accepted from different sources, varies significantly, from 312 to 433 m³. The composition of biogas changes little, and the theoretical content of methane in it ranges from 53% to 57%. The yield and composition of biogas was estimated using the Tabasaran-Rettenberger equation, LandGEM, DOD (IPCC), CLEEN models and Russian regulatory methods. The average total biogas yield was 195 m3/t waste with a variation coefficient of 38%, the average methane yield was 95 m³/t waste with a variation coefficient of

46%, and the average calorific value of biogas, related to 1 ton of waste from which it was formed, was 3 400 MJ/t of waste with a coefficient of variation of 44%. With a conversion efficiency of 39%, landfill gas from 1 ton of waste can generate 368 kWh of electricity. The total volume of municipal solid waste in Russia, subject to the full collection and use of biogas, makes it possible to generate 22.1 billion kWh of electricity, which is about 2% of the total energy consumption in the country. For a number of countries, the energy potential of landfill gas ranged from 0.05% (China) to 4.5% (Spain). Thus, landfill gas is a significant source of electricity in the overall energy balance.

Keywords: *biogas, landfill gas, formation potential, energy potential, MSW landfill.*

Введение

Твердые коммунальные отходы состоят в значительной части из органических соединений, которые после захоронения на полигонах начинают разлагаться с выделением биогаза, состоящего из метана, углекислого газа, азота и небольшого количества органических и токсичных соединений. Оценка выделений метана на полигонах твердых коммунальных отходов важна как с точки зрения оценки потенциала производства энергии, так и для определения объема выбросов парниковых газов, так как метан является не только потенциально источником энергии, но и мощным парниковым газом с потенциалом глобального потепления в 25 раз превышающим потенциал глобального потепления CO_2 при оценке за 100-летний период [1] или в 86 раз, если оценивать 20-летний период [2].

Обзор моделей образования свалочного газа приведен в работах [3–5]. Модели генерации включают две составляющие:

– расчет теоретического образования биогаза при полном разложении отходов (обычно обозначаемое как L_0), величина которого зависит в большей части от состава отходов, в разных источниках для L_0 указываются значения от 40 до 500 м^3/т отходов, среднее значение равно 220 м^3/т отходов [4];

– кинетическая модель (кинетическое уравнение) образования биогаза как функция от времени, которая также может учитывать параметры тела полигона – температуру в слое отходов, влажность, определяемую климатическими условиями. От интенсивности выхода биогаза зависит длительность периода, когда он образуется (как правило, он составляет по разным данным от 10…15 до 30 лет [4]). Кинетические модели классифицируются по степени зависимости скорости распада от определяющих факторов (нулевые, первые и вторые порядки распада), математическим и численным моделям [5].

Учет скорости образования биогаза важен для оценки его выхода на разнородных участках (картах) полигонов, в которых производится заполнение с разной интенсивностью и сроками. Расчет выхода биогаза применяется к каждой партии отходов, а общий выход – суммой выхода от каждой партии.

Для оценки выхода свалочного газа в настоящее время наиболее часто используются модель (уравнение) Табасарана – Реттенбергера [6], модель LandGEM Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [7], и модель FOD распада первого порядка IPCC (Межправительственной группы экспертов по изменению климата) [8].

Модельные прогнозы скорости сбора свалочного газа в среднем были ниже фактического сбора [9].

Для оценки суммарного энергетического потенциала региона или крупного действующего полигона при стабильном потоке отходов интенсивность образования биогаза на его общий выход в единицу времени не влияет, поэтому потенциал возможно оценивать по количеству складируемых отходов в единицу времени [8].

Целью работы являлось сравнение потенциала образования биогаза на полигонах ТКО, определенного по наиболее часто используемым методикам, и определение энергетического потенциала свалочного газа в энергосистеме страны при условии его полного использования для выработки электроэнергии.

Методы расчета выхода биогаза (материалы и методы)

Оценка теоретического выхода биогаза по химической реакции его образования

Уравнение химической реакции образования биогаза в работе [4] представлено в следующем виде:

$$C_aH_bO_cN_d + nH_2O \rightarrow xCH_4 + yCO_2 + wNH_3 + vC_5H_7O_2N + Q, \quad (1)$$

где $C_aH_bO_cN_d$ – химический состав органических отходов; H_2O – влага; CH_4 – метан; CO_2 – углекислый газ; NH_3 – аммиак; $C_5H_7O_2N$ – сухой остаток после полного разложения; Q – тепловая энергия, выделяющиеся при реакции n, x, y, w, z – стехиометрические коэффициенты.

При метановом брожении органических веществ твердых отходов в анаэробных условиях они практически все преобразуется в газ и доля сухого остатка составляет около 4% [4], поэтому соединением $C_5H_7O_2N$ в уравнении можно пренебречь. Но кроме углерода, водорода, кислорода и азота в органических отходах присутствует сера, а в биогазе – сероводород H_2S. Поэтому уравнение образования биогаза (1) может быть записано в следующем виде:

$$C_aH_bO_cN_dS_e + nH_2O \rightarrow xCH_4 + yCO_2 + wNH_3 + zH_2S + Q \quad (2)$$

Уравнение материального баланса реакции (2) имеет вид:

$$\begin{cases} a = x + y; \\ b + 2n = 4x + 3w + 2z; \\ c + n = 2y; \\ d = w; \\ e = z. \end{cases} \quad (3)$$

Из уравнения (3) могут быть определены неизвестные стехиометрические коэффициенты n, x, y, w, z:

$$n = a - b/4 - c/2 + 3d/4 + e/2;$$
$$x = a/2 + b/8 - c/4 - 3d/8 - e/4;$$
$$y = a/2 - b/8 + c/4 + 3d/8 + e/4;$$
$$w = d;$$
$$z = e.$$

Количество химических элементов a, b, c, d, e в соединении $C_aH_bO_cN_dS_e$ определяется элементарным составом отходов, который обычно записывается в виде массовых процентов содержания компонентов в рабочей массе и включает содержание химических элементов $C_р$, $H_р$, $O_р$, $N_р$, $S_р$, зольность $A_р$ и влажность Wp. Связь между количеством химических элементов и элементарным составом имеет вид:

$$a = 0{,}01 \cdot C_p/12{,}011 \cdot 10^{-3} = 0{,}833\ C_p;$$

$$b = 0{,}01 \cdot H_p/1{,}0079 \cdot 10^{-3} = 9{,}92\ H_p;$$

$$c = 0{,}01 \cdot O_p/15{,}999 \cdot 10^{-3} = 0{,}625\ O_p; \quad (4)$$

$$d = 0{,}01 \cdot N_p/14{,}0067 \cdot 10^{-3} = 0{,}714\ N_p;$$

$$e = 0{,}01 \cdot S_p/32{,}06 \cdot 10^{-3} = 0{,}312\ S_p,$$

где 12,011; 1,0079; 15,999; 14,0067; 32,06 – молярная масса соответствующих химических элементов, г/моль.

Размерность коэффициентов уравнений (3) – кг/кг отходов, поэтому удельные массы и объем V получаемых газов имеет вид:

$$V = m \cdot 0{,}01 \cdot M/\rho,$$

где V – удельный объем газа, м3/кг отходов; m – стехиометрический коэффициент уравнения (2) для соответствующего газа; M – молярная масса газа, г/моль; плотность газа, кг/м^3.

Таким образом объемы газов, получаемые из 1 кг отходов, равны:

$$V_{CH4} = (9{,}317\ C_p + 27{,}76\ H_p - 3{,}497\ O_p - 5{,}992\ N_p - 1{,}745\ S_p) \cdot 10^{-3};$$

$$V_{CO2} = (9{,}268\ C_p - 27{,}61\ H_p + 3{,}479\ O_p + 5{,}960\ N_p + 1{,}736\ S_p) \cdot 10^{-3}; \quad (5)$$

$$V_{NH3} = 15{,}74 \cdot 10^{-3}\ N_p;$$

$$V_{H2S} = 6{,}990 \cdot 10^{-3}\ S_p,$$

а общий выход биогаза:

$$V = 18{,}58\ C_p + 0{,}1465\ H_p - 0{,}01846\ O_p + 15{,}71\ N_p + 6{,}981\ S_p. \quad (6)$$

Доля газа v в объемных процентах будет иметь вид:

$$v_{CH4} = \frac{9{,}317\ C_p + 27{,}76\ H_p - 3{,}497\ O_p - 5{,}992\ N_p - 1{,}745\ S_p}{18{,}58\ C_p + 0{,}1465\ H_p - 0{,}01846\ O_p + 15{,}71\ N_p + 6{,}981\ S_p} 100\%;$$

$$v_{CO2} = \frac{9{,}268\ C_p - 27{,}61\ H_p + 3{,}479\ O_p + 5{,}960\ N_p + 1{,}736\ S_p}{18{,}58\ C_p + 0{,}1465\ H_p - 0{,}01846\ O_p + 15{,}71\ N_p + 6{,}981\ S_p} 100\%;$$

$$v_{NH3} = \frac{15{,}74\ N_p}{18{,}58\ C_p + 0{,}1465\ H_p - 0{,}01846\ O_p + 15{,}71\ N_p + 6{,}981\ S_p} 100\%; \quad (7)$$

$$v_{H2S} = \frac{6{,}990\ S_p}{18{,}58\ C_p + 0{,}1465\ H_p - 0{,}01846\ O_p + 15{,}71\ N_p + 6{,}981\ S_p} 100\%.$$

В табл. 1 представлен средний состав отходов по данным разных российских источников и рассчитанный по ним теоретический выход биогаза. Выход биогаза из тонны отходов для разного состава изменяется в широких пределах, от 312 до 433 м^3, но состав биогаза изменяется мало, теоретическое содержание метана в нем составляет от 53% до 57%. Согласно данным работы [4] содержание метана в биогаза, образующемся их различных органических материалов, составляет 50…71,4%, для пищевых отходов эта величина равна 56%.

Таблица 1

Состав твердых бытовых отходов в России

Фракция	Влажность (данные АКХ им. Панфилова), % а)	Номер					
		1	2	3	4	5	6
		Белгород, 2017 г.б)	Москва, 2012 г.в)	Пермь, 2009 г. е)	Екатеринбург, 2009 г. е)	Среднее по РФ, 2017 г.г)	Средняя полоса РФ д)
Морфологический состав, мас. %							
Пищевые отходы	72	36,8	18	9	18	33	41,3
Бумага и картон	25	21,5	19,7	23	20	40	33,9
Текстиль	20	3,2	4,26	5	12	6,5	4,3
Древесина	20	6,8	0,88	1	1	5	2
Кожа, резина	5	0	0,81	2	4	1,3	0,8
Пластмасса	8	16,6	14,2	15	22	6	3,6
Негорючая масса и отсев	20	15,1	42,1	45	23	8,2	14,1
Влажность, %	–	38	29	–	–	–	50
Элементарный состав, мас.%							
C_p	–	22,7	16,1	13,7	21,4	22,7	16,3
H_p	–	3,1	2,2	1,8	2,8	3,0	2,2
O_p	–	14,3	9,7	8,2	11,3	17,4	12,7
N_p	–	0,6	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5
S_p	–	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
A_p	–	21,1	42,5	35,9	23,7	16,1	18,2
W_p	–	38,0	29,0	40,0	40,0	40,0	50,0
Всего	–	100	100	100	100	100	100
Выход биогаза по стехиометрическому уравнению							
Объем, м³/т отходов		433	307	260	410	433	312
Состав, об. %							
CH4		56%	56%	56%	57%	53%	53%
CO2		41%	41%	41%	40%	44%	44%
NH3		2,3%	2,2%	1,8%	2,4%	2,3%	2,6%
H2S		0,26%	0,30%	0,30%	0,37%	0,31%	0,32%
Теплота сгорания, МДж							
отходов, 1 кг		8 363	5 907	4 602	7 900	7 888	5 134
биогаза, полученного из отходов		8 693	6 202	5 252	8 336	8 216	5 882

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

б) Отчет о проведенном исследовании биогазового потенциала образца пищевых отходов на основе ТБО «ТК «Экотранс». Белгород: АО «Белгородский институт альтернативной энергетики», 2017. 6 с.

в) Тугов А.Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО. Дис. … д-ра техн. наук. М.: Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт, 2012. 349 с.

г) Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 15-2016 «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)» [Электронный документ]. М.: Бюро НДТ, 2016. 198 с. URL: https://www.gost.ru/documentManager/rest/file/load/1514720213686.

д) МДС 13-8.2000. Концепция обращения с твердыми бытовыми отхо-дами в Российской Федерации. Утв. постановлением коллегии Госстроя России от 22 декабря 1999г. № 17. М., 1999. 20 с.

е) Ильиных Г.В., Слюсарь, Н.Н., Коротаев В.Н. Морфологический состав отходов: основные тенденции изменения // Твердые бытовые отходы. 2011. № 8. С. 38-41.

В работе [4] отмечается, что уравнение (1) не позволяет определить фактический выход углекислого газа, так CO_2 растворяется в фильтрате и осаждается в нем виде карбонатов, тогда как CH_4 в фильтрате малорастворим. По этим причинам в практических расчетах выход свалочного газа оценивается по эмпирическому уравнению:

1 моль органического углерода C → 22,4 л газа (CH_4 + CO_2)

или

1 кг органического углерода C → 1,867 м^3 газа (CH_4 + CO_2),

с соотношением CH_4/ CO_2 = 0,55…0,60 [4]. Таким образом

1 кг органического углерода C → 1,867 м^3 (CH_4 + CO_2), (8)

и оценка максимального теоретического выхода свалочного газа часто выполняется с использованием уравнения (8) и заданного соотношение CH4 и CO2, равному 0,55…0,6, то есть

V_{CH4} =1,03 …1,12 м^3/кг C; V_{CO2} = 0,75…0,87 м^3/кг C.

Обычно органический углерод в сухих органических ТКО составляет около 50% [10], или 200-250 кг/т влажных ТКО [6] но необходимо учитывать, что из него только 50% биоразлагаемы [10].

Теплота сгорания отходов, рассчитанная по элементарному составу с применением формулы Менделеева, оказалась ниже, чем теплота сгорания выделяемого их них биогаза, несмотря на то, что уравнение химической реакции образования биогаза является экзотермической, то есть энергия продуктов реакции должна быть ниже, чем энергия исходных веществ.

Общий вид кинетических моделей образования свалочного газа

Общее кинетическое уравнение образования биогаза имеет вид [4]:

$$\frac{dC}{dt} = f(t, C^n), \quad (9)$$

где C – количество метана или биоразлагаемых органических веществ; t – время; n – показатель степени.

По показателю степени n различают следующие модели (рис. 1):

- нулевого первого порядка (n = 0), в которых скорость образования биогаза постоянная и не зависит от времени, а ограничивается влажнростью, темпераутрой и другими факторами;
- первого порядка (n = 1), в которых скорость образования биогаза зависит от массы оставшихся неразложившихся органических веществ, параметры при постоянная и не зависит от времени.

Наиболее широко в расчетах применяются модели первого порядка, так как позволяют получать более адекватные результаты [5].

Начало выделения биогаза после захоронения отходов в разных источниках варьируется от нескольких недель до года, в модели IPCC среднее время задержки составляет 6 месяцев [4].

Модель (уравнение) Табасарана - Реттенбергера

Модель Табасарана - Реттенбергера [6], используемая во многих европейских странах, позволяет определить потенциал образования биогаза и его выход за заданное время.

Уравнение нулевого порядка, постоянный выход биогаза	Уравнения первого порядка		
	в зависимости от времени	в зависимости от массы органической составляющей	в зависимости от времени и массы органической составляющей
$\frac{dC}{dt} = -k$	$\frac{dC}{dt} = -kt$	$\frac{dC}{dt} = -kC$	$\frac{dC}{dt} = -kC$
$C_2 = C_1 - k(t_2 - t_1)$	$C_2 = C_1 - k\,ln\,(t_2/t_1)$	$C_2 = C_1 \exp\,(k(t_2 - t_1))$	$C_2 = C_1 \exp\left(k\frac{t_2}{t_1}\right)$

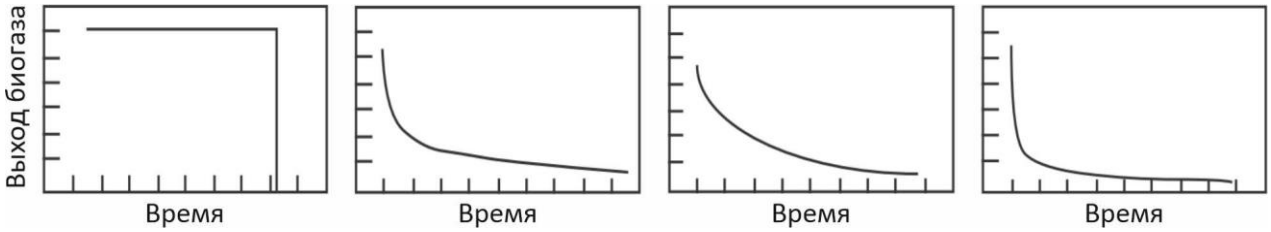

Рис. 1. Уравнения для прогнозирования образования свалочного газа [4]:
C – количество разлагаемых отходов; t – время; C_1, C_2 – количество разлагаемых отходов в периоды времени t_1, t_2; k – константа скорости реакции

Общий вид уравнения Табасарана – Реттенбергера:

$$L_0 = 1{,}868 \cdot C_0\,(0{,}014 \cdot T + 0{,}028);$$
$$L_{\Sigma t} = G_0\,(1 - 10^{-kt}); \qquad (10)$$
$$L_t = G_0\,(10^{-kt} - 10^{-k(t+1)}),$$

где L_0 – потенциал образования метана, м^3/т отходов; C_0 – содержание органического углерода в отходах(170…220 кг/т отходов); T – температура в толще полигона, °C (30-35°C); k – константа разложения (0,035…0,045), 1/год; $L_{\Sigma t}$ — количество выделившегося газа за время t, м^3/т отходов; L_t — количество выделившегося газа в годе t, м^3/т отходов; t – время с момента захоронения отходов, лет.

При расчете по модели Табасарана-Реттенбергера в интервалах рекомендуемых параметров объем образования биогаза L_0 изменяется в пределах от 187 до 247 м^3/т отходов (рис. 2).

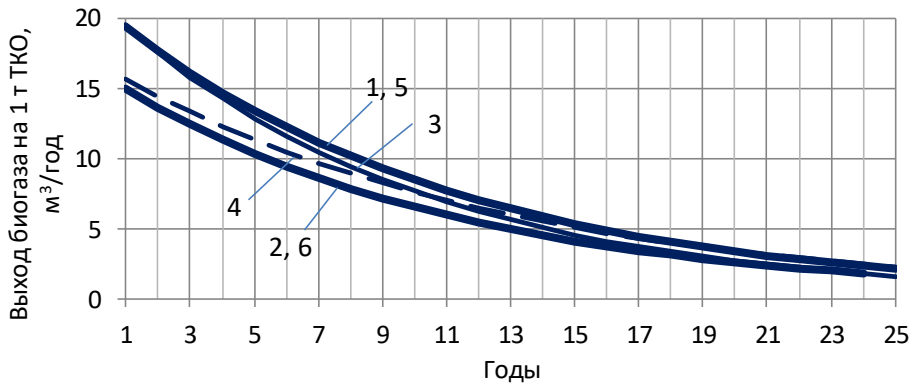

Рис. 2. Выход биогаза, рассчитанный по модели Табасарана-Реттенбергера:
при изменении C_0: 1 – C_0 = 170 кг/т; 2 – C_0 = 200 кг/т (k = 0,04; T = 40°C);
при изменении k: 3 – k = 0,035; 2 – k = 0,045 (C_0 = 200 кг/т; T = 40°C);
при изменении T: 3 – T = 35°C; 2 – T = 45°C (C_0 = 200 кг/т; k = 0,04)

Модель LandGEM

Модель разработана Центром технологий управления Агентства по охране окружающей среды США (Control Technology Center of the US EPA). В настоящее время доступна реализация методики в электронных таблицах MS Excel, версия 3.03 от 2020 г. (https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software).

Модель для оценки образования свалочного газа использует уравнение разложение первого порядка [7]:

$$L_{CH4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} k\, L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}}, \tag{11}$$

где L_{CH4} –образование метана, м^3/год; i – приращение времени на 1 год; j – приращение по времени на 0,1 года; k – константа разложения, зависящая от влажности, состава, температуры, кислотности отходов, 1/год; L_0 – потенциал образования метана, м^3/т отходов; M_i – масса партии отходов, захороненных в i-м году, т; t_{ij} – срок нахождения на полигоне партии отходов с массой M_i , лет (действительное число, которое может быть нецелым).

Потенциал образования L_0 и константа разложения k выбираются пользователем из предустановленных значений, которые приняты в документах Clean Air Act (CAA) и Compilation of Air Pollutant Emissions Factors (AP-42) для отходов, размещенных в местности с континентальным и засушливым климатом и для биогаза из реакторов, так же можно задать свои значения. Для континентального климата согласно CAA значение потенциала образования равно 170, константа разложения 0,05.

Для ряда стран Центральной и Южной Америки, Азии Агентство по охране окружающей среды США разработала модели образования свалочного газа с учетом особенностей этих стран.

Модель IPCC

Модель FOD, разработанная Межправительственной группой экспертов по изменению климата IPCC, как и модель LandGEM реализована в электронных таблицах MS Excel. Модель оценивает образование метана на основе содержания в отходах биоразлагаемого углерода.

Потенциал образования метана L_{CH4}, кг/кг отходов, имеет вид [8]:

$$L_{CH4} = DDOC_M \cdot F \cdot 16/12 = 1{,}33 \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot MSF \cdot F \tag{12}$$

$DDOC_M$ – масса разлагаемого органического углерода, кг/кн отходов; F – объемная доля CH_4 в свалочном газе (по умолчанию: 0,5); 16/12 = 1,33 – отношения молярной массы метана к молярной массе углерода; DOC – доля органического углерода в отходах; DOC_F – доля органического углерода, который разлагается с выделением биогаза (значение по умолчанию 0,5, для разных видов органических отходов изменяется от 0,5 до 0,77); MSF – поправочный коэффициент для аэробного разложения, зависящий от качества уплотнения отходов и наличия герметизирующего покрытия, препятствующего доступу воздуха с слои отходов (изменяется от 0,4 до 1,0).

При изменении DOC от 0,114 до 0,227 (табл. 1), DOC_F = 0,5 и MSF = 1 потенциал образования метана составляет от 0,038 до 0,075 кг/кг отходов, что при плотности свалочного газа 1,35 кг/м^3 (50% CH_4 и 50% CO_2) и объемной доли метана 50% соответствует объему свалочного газа 56…110 м^3/т отходов

По данным модели для восточной Европы удельная эмиссия метана в 2022 году составляет 80 кг/т отходов или 60 м^3/т отходов.

Расчет выхода метана производится по кинетическому уравнению первого порядка, которое в работе [4] представлено в следующем виде:

$$CH_4(t) = \sum_{x}^{n} (e^k - 1)\, R(x)\, L_0(x)\, e^{-k(t-x)} \quad (13)$$

где $CH_4(t)$ – метан, образовавшийся в год t, т/год; k – константа образования метана, год$^{-1}$, $k = \ln(2)/t_{1/2}$, где $t_{1/2}$ – время полуразложения отходов, лет (для влажного климата со среднегодовой температурой менее 20°С значение для разных видов отходов изменяется от 12 до 35 лет); $R(x)$ – количество отходов, размещенные на полигоне в году x, т; $L_0(x)$ – потенциал образования биогаза отходов, размещенных на полигоне в году x, кг/кг.

Модель CLEEN

Модель «Улавливание выбросов на свалках для нужд энергетики» (CLEEN), разработанная в Техасском университете в Арлингтоне, основана на статической модели, полученной обработкой результатов измерений выхода биогаза в 27 лабораторных полигонных реакторах. Фактический выход биогаза в реакторах (потенциал образования метана L_{CH4}) составил от 24,7 до 113,6 м^3/кг отходов. Получено уравнение множественной линейной регрессии для константы скорости образования метана первого порядка в зависимости от состава отходов, годового количества осадков и температура окружающей среды. Так как в лабораторных условиях скорость образования отходов выше, чем в полевых, уравнение было скорректировано с учетом фактических данных по извлечению газа из 11 свалок в разных странах [11]. Сравнение расчета выхода биогаза по модели CLEEN в 4 из 6 случаев дали более близкие к фактическим результаты, чем оценки моделей LandGEM и IPCC.

Расчет выхода биогаза по российским нормативным документам

Методика [12] предназначена для проведения расчетов выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и при оценке выбросов от полигонов ТКО при их проектировании.

Выхода биогаза при метановом брожении влажных отходов Q_w, кг/кг отходов, предлагается определять по уравнению:

$$Q_w = 10^{-6}\, R\, (100 - W)(0{,}92\,Ж + 0{,}62\,У + 0{,}34\,Б), \quad (14)$$

где R – содержание органической составляющей в отходах, %; Ж, У, Б – содержание жироподобных, углеводоподобных и белковых веществ в органике отходов, %.

В приведенных в методике примерах приняты следующие характеристики отходов: R = 55%; Ж = 2%; У = 83%; Б = 15%; W = 47%, потенциал образования метана при этих данных равен 136 м^3/т отходов.

Для проектных расчетов содержание метана в биогазе предлагается принимать 52,915 об. %.

Количественный выход биогаза за год $P_{уд}$, кг/кг отходов, определяется по уравнению нулевого порядка и имеет вид:

$$P_{уд} = \frac{Q_w}{t_{сбр}},$$

где $t_{сбр}$ – период полного разложения органической части отходов, лет, определяемый по эмпирическому уравнению:

$$t_{сбр} = \frac{10248}{t_{ср}^{0{,}301966} \cdot T_т},$$

где $t_{ср}$ – средняя температура воздуха за теплый период года (период с положительными температурами воздуха), °С; $T_т$ – продолжительность теплого периода года, дни.

В среднем значение $t_{сбр}$ составляет 20 лет. Принимается, что фаза активного выхода биогаза начинается через 2 года после захоронения отходов, таким образом при расчете выхода биогаза учитываются отходы, завезенные за последние $t_{сбр}$ лет, но без учета последних двух лет. Считается, что биогаз образуется только в теплый период года при температуре воздуха выше 0°С, но в диапазоне температур от 0 до 8 °С его выход в 1,3 раза меньше, чем при температурах больше 8°С.

Рекомендации [13] предназначены для проектных организаций. Состав биогаза, приведенный в рекомендациях, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Состав свалочного газа, об. %

№	Тип биогаза	CH_4	CO_2	O_2	N_2
1	Чистый биогаз, полученный в анаэробных условиях	55	45	–	–
2	В биогазе присутствуют присосы воздуха, кислород и азот в соотношении, свойственном атмосферному воздуху	40	30	6	24
3	Воздух поступает в слой отходов, кислород воздуха участвует в микробиологическом процессе	45	35	1	18
4	Комбинации типов 2 и 3	35	30	5	30

Метановый потенциал L_{CH4}, м³/т отходов, рассчитывается для каждой фракции отходов i:

$$L_{CH4} = (1 - 0{,}01W) \sum \left(11\,088 \frac{n_{Ci}}{\mu_i} (1 - 0{,}01\,A_i)\, B_i \right) x_{ci} = \\ = \sum \left(11\,088 \frac{n_{Ci}}{\mu_i} (1 - 0{,}01\,A_i)\, B_i \right) (1 - 0{,}01W_i) x_i = \quad (15)$$

где W и W_i – влажность отходов и фракции, % n_c – число атомов углерода в химическом соединении фракции (табл. 3); μ_i – молярная масса фракции, г/моль (табл. 3); Ai— зольность фракции, %; B_i – коэффициент биоразложения; x_{ci} 00 x_i – доля фракции в сухих и влажных отходах.

Таблица 3

Химические формулы фракций отходов

Фракция	Химическая формула	Молярная масса, μ, г/моль
Пищевые отходы	$C_{320,3}H_{507,9}O_{188,4}N_{14,9}S$	7606,5
Бумага	$C_{580,6}H_{952,3}O_{440,8}N_{3,49}S$	15051,9
Садово-парковые отходы	$C_{424,8}H_{635,9}O_{253,8}N_{6,41}S$	9916,04
Дерево	$C_{1321}H_{1904}O_{855,6}N_{4,6}S$	31542
Ткань, текстиль	$C_{978,8}H_{1396}O_{416,8}N_{70,2}S$	20825,2
Кожа	$C_{404,4}H_{634,9}O_{58,1}N_{57,2}S$	7202,1
Резина	$C_{454,9}H_{69,4}NS$	5574
Пластик	$C_{3506}H_{5003}OS$	63,075

При расчете по составу отходов, представленных в табл. 1, потенциал выхода метана, рассчитанный согласно рекомендациям [13], составляет от 40 до 95 м³/т отходов. Объем образования биогаза рекомендуется принимать в два раза выше объема метана (содержание метана – 50%), таким образом объем биогаза составляет от 80 до 190 м³/т отходов.

Общий объем образующегося метана Q, м^3, имеет вид:

– для закрытых полигонов

$$Q = L_{CH4}\, M(1 - e^{-k_2\tau}); \tag{16}$$

– для действующих полигонов

$$Q = L_{CH4}\, M_г(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2\tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1\tau}), \tag{17}$$

где M – общая масса влажных отходов, т; Mг – масса влажных отходов, захораниваемых в год, т; τ – время разложения, лет; k_1 – константа скорости реакций в фазе ацетогенеза; k_2 – константа разложения в фазе метагенеза.

Во влажных условиях значение коэффициента k_1 равно 0,4 для быстроразлагаемых отходов и 0,1 для среднеразлагаемых, для средних по влажности условий – соответственно 0,25 ми 0,05. Значение коэффициента k_2 во влажных условиях равно 0,098 для среднеразлагаемых отходов и 0,046 для медленноразлагаемых, для средних по влажности условий – соответственно 0,046 ми 0,0276.

Объем образования метана в год L_t, м^3/год:

– для закрытых полиногов

$$L_t = L_{CH4}\, M\, k_2\, e^{-k_2\tau}; \tag{18}$$

– для закрытых полиногов

$$L_t = L_{CH4}\, M_г \frac{k_1\, k_2\, \tau}{k_2 - k_1} (e^{-k_1\tau} - e^{-k_2\tau}). \tag{19}$$

Оценка энергетического потенциала биогаза (Результаты)

Сравнение характеристик биогаза по разным источникам

Согласно расчетам по разным методикам удельный потенциал выхода биогаза значительно различается (табл. 4).

Таблица 4

Оценка удельного потенциала биогаза

Источник	Выход, м^3/т отходов		Содержание метана в биогазе, об. %	Теплота сгорания биогаза, МДж/т отходов
	биогаза L_0	метана L_{CH4}		
Оценка теоретического выхода биогаза по химической реакции его образования, выражения (5)–(7), при константа разложения органических остатков 0,5	130…217	74…126	53…57%	5 250…8 700
Уравнение Табасарана – Реттенбергера (10)	187…247	–	–	–
Модель LandGEM	200…340	100…170	50%	3 590…6 100
Модель IPCC	120	60	50%	2 150
Модель CLEEN (опытные данные)	–	24,7…11 3,6	–	900…4 000
Методика [12]	257	136	52,915%	4 880
Методика [13]	80 … 190	40 … 95	50%	1 435…3 400
Среднее	195	95	52%	3 400
Коэффициент вариации	38%	46%	5%	44%

Отличие в значениях объясняется различным фракционным составом отходов, принятых в методиках, а также разной степенью разложения отходов.

Оценка энергетического потенциала отходов в России

При КПД преобразования в электроэнергию 39% свалочный газ из 1 т отходов позволяет выработать

$$3\,400 \cdot 0{,}39/3{,}6 = 368 \text{ кВт·ч электроэнергии.}$$

Общий объем твердых коммунальных отходов в России, захороненных на полигонах по данным Росприроды в 2019 г. составил около 60 млн т., что позволяет выработать 22,1 млрд кВт·ч электроэнергии. Это составляет около 2% от общего энергопотребления в стране (около 1 трлн кВт·ч в год).

Согласно территориальной схемы обращения с отходами на территории Белгородской области в год образуется 587,5 тыс. т ТКО, из которых потенциально может быть выработано 216 млн кВт·ч электроэнергии. Это составляет около 1,4% от общего потребления в области в 2019 г. (15,9 млрд кВт·ч), или около 15% от электроэнергии, потребляемым населением.

Оценка энергетического потенциала отходов в зарубежных странах

Для ряда стран, по которым в работе [3] приведен энергетический потенциал свалочного газа, был определена возможная доля замещения общего электропотребления этих стран (табл. 5). Энергетический потенциал свалочного газа составил от 0,05% (Китай) до 4,5% (Испания).

Таблица 5

Энергетический потенциал биогаза полигонов ТКО (энергия, содержащееся в биогазе) [3]

Страна	Население, млн чел.	Энергетический потенциал		Доля в потреблении электроэнергии
		млн кВт·ч/год	кВт·ч/(год·чел.)	
Мексика, теоретический	126	30 200	240	11%
экономически оправданный		1 100	8,7	0,4%
Уругвай	3,48	77…115*	22…33	0,7 …1%
Бразилия	213,3	6 900…11 800	32…55	1,2…2%
Сербия	6,9	578,24	84	2,1%
Городские районы Африки	605	62 500 … 122 200	103…202	–
Польша	37,9	115	3	0,1%
Турция	86	4 850	56	1,5%
Китай	1 443	3666,06	2,5	0,05%
Испания	47,4	10300*	217	4,5%

* Пересчитано из потенциала выработки электроэнергии с применением КПД 39%

Таким образом свалочный газ является существенным источником электроэнергии в общем энергобалансе.

Выводы

На основе уравнения химической реакции образования биогаза предложены уравнения для расчета удельного выхода компонентов биогаза из 1 кг отходов и их долей в объемных процентах. Расчеты по предложенным формулам показали, что выход биогаза из тонны отходов для российских ТКО, состав которых принят по разным ис-

точникам, значительно изменяется, от 312 до 433 м^3. Состав биогаза изменяется мало, и теоретическое содержание метана в нем составляет от 53% до 57%.

Выход и состав биогаза был оценен по уравнению Табасарана-Реттенбергера, модели LandGEM, разработанной Центром технологий управления Агентства по охране окружающей среды США, модели FOD, разработанной Межправительственной группой экспертов по изменению климата IPCC, модели CLEEN, разработанной в Техасском университете в Арлингтоне, и по российским нормативным методикам. Удельный потенциал выхода биогаза, определенный по разным методикам, значительно различается. Средний общий выход биогаза составил 195 м^3/т отходов при коэффициенте вариации 38%, средний выход метана – 95 м^3/т отходов при коэффициенте вариации 46%, а средняя теплота сгорания биогаза, отнесенная к 1 тонне отходов, из которых он образовался, составила 3 400 МДж/т отходов при коэффициенте вариации 44%.

При КПД преобразования в электроэнергию 39% свалочный газ из 1 т отходов позволяет выработать 368 кВт·ч электроэнергии. Общий объем твердых коммунальных отходов в России при условии полного сбора и использования биогаза позволяет выработать 22,1 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет около 2% от общего энергопотребления в стране. Для ряда стран энергетический потенциал свалочного газа составил от 0,05% (Китай) до 4,5% (Испания). Таким образом свалочный газ является существенным источником электроэнергии в общем энергобалансе.

Библиографический список

1. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing / P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen et all. // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. s. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. P. 129-234.
   URL: https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/
2. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing / G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon et all // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. New York: Cambridge University Press, , 2013. P. 659-740.
   URL: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
3. Santos I.F.S., Barros R.M., Filho G.L.T. Biogas Production From Solid Waste Landfill // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020. Vol. 2. P. 11–19.
   DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10585-5
4. Andreottola G., Cossu R., Ritzkowski M. Landfill gas generation modeling // Solid waste landfilling. Concepts, Processes, Technologies; Eds R. Cossu, R. Stegmann. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 419-437.
   DOI: 10.1016/B978-0-12-407721-8.00020-6
5. Kamalan H., Sabour M.R., Shariatmadari N. A Review on Available Landfill Gas Models // Journal of Environmental Science and Technology. 2011. Vol 4(2). P. 79-92.
   DOI: 10.3923/jest.2011.79.92
6. Tabasaran O. Gas production from landfill // Household Haste Management in Europe. Economics and Techniques; Eds. A.V. Bridgewater, K. Lidgren. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1981. P. 159-175.
7. Alexander A., Burklin C., Singleton A. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02. User's Guide. Washington, D.C.: U.S. EPA, 2005. 48 p.
   URL: https://www3.epa.gov/ttncatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf
8. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5 – Waste / Eds. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa et al. Hayama, Japan: IGES, 2006. 155 p.

URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html

9. Amini H.R., Reinhart D.R., Mackie R. Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties // Waste Manage. 2012. Vol. 32. P. 305-316. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.021

10. Andreottola G., Cossu R. Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato // Landfilling of Waste: Biogas; Eds. Th. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann. London: E&FN Spon, 1996. P. 237-265.

11. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model / R.V. Karanjekar, A. Bhatt, S. Altouqui // Waste Management. 2015. Vol. 46. P. 389-398. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.030

12. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов / Н.Ф. Абрамов, Э.С. Санников, Н.В. Русаков и др. М.: НПП «Экопром»; АКХ им. КД. Памфилова; НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н.Сысина; НИИ Атмосфера; ЗАО НПП «Лотус», 2004. 20 с.

13. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации полигонов захоронения твердых бытовых отходов разработаны в соответствии с нормативными материалами по охране окружающей среды / Н.Ф. Абрамов, Я.И. Вайсман, С.В. Максимова и др. М.: АКХ им. КД. Памфилова; Пермский технический университет, 2003. 27 с.

References

1. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz M., & Van Dorland, R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor, & H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 129-234). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/

2. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., & Bex, V. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659-740). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

3. Santos, I.F.S., Barros, R.M., & Filho, G.L.T. (2020). Biogas Production From Solid Waste Landfill. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 2*, 11–19. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10585-5

4. Andreottola, G., Cossu, R., & Ritzkowski, M. (2019). Landfill gas generation modeling. In Cossu, R. & Stegmann, R. (Eds.) *Solid waste landfilling. Concepts, Processes, Technologies* (pp. 419-437). Elsevier. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00020-6

5. Kamalan, H., Sabour, M., & Shariatmadari, N. (2011). A review on available landfill gas models. *J. Environ. Sci. Technol., 4 (2)*, 79-92. http://dx.doi.org/10.3923/jest.2011.79.92

6. Tabasaran, O. (1981). Gas production from landfill. In Bridgewater, A.V. & Lidgren, K. (Eds.) *Household Haste Management in Europe. Economics and Techniques* (pp. 159-175). Van Nostrand Reinhold Co.

7. Alexander, A., Burklin, C., & Singleton, A. (2005). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02. User's Guide*. U.S. EPA. https://www3.epa.gov/ttncatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf

8. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5 – Waste*. IGES. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html

9. Amini, H.R., Reinhart, D.R., & Mackie, R. (2012). Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. *Waste Manage*, *32*, 305-316. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.021

10. Andreottola, G., & Cossu, R. (1996). Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato. In Christensen, Th., Cossu, R., & Stegmann, R. (Eds.), *Landfilling of Waste: Biogas* (pp. 237-265). E&FN Spon.

11. Karanjekar, R.V., Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M.L., Hossain, M.D.S., & Chen, V. (2015). Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. *Waste Management*, *46*, 389-398. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.030

12. Abramov, N.F., Sannikov, E.S., Rusakov, N.V., Milyaev, M.B., Khalevin, R.G., Lifanov, A.V., Burenin, I.S., & Turbin I.S. (2004). *Metodika rascheta kolichestvennykh kharakteristik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot poligonov tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov* [*Methodology for calculating the quantitative characteristics of emissions of pollutants into the atmosphere from solid household and industrial waste landfills*]. NPP "Ekoprom"; AKH im. KD. Pamfilova; NII EC and GOS them. A.N. Sysina; Research Institute Atmosphere; CJSC NPP Lotus.

13. Abramov, N.F., Vaysman, YA.I., Maksimova, S.V., Glushankova, I.S., Batrakova, G.M., Vaysman, O.YA., Korotayev, V.N., & Rudakova, L.V. (2003). *Rekomendatsii po raschetu obrazovaniya biogaza i vyboru sistem degazatsii poligonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov razrabotany v sootvetstvii s normativnymi materialami po okhrane okruzhayushchey sredy* [*Recommendations for the calculation of biogas generation and the selection of degassing systems for municipal solid waste disposal sites have been developed in accordance with regulatory materials for environmental protection*]. AKKH im. KD. Pamfilova, Permskiy tekhnicheskiy universitet.

Сведения об авторе

Трубаев Павел Алексеевич, д-р. техн. наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологий.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород.

SPIN-код: 5743-7260

ORCID: 0000-0003-1710-1599

E-mail: trubaev @gmail.com

Author about

Pavel Trubaev, Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technologie.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-1710-1599

E-mail: trubaev @gmail.com