

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 662.76

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ С ВНЕШНИМ И ВНУТРЕННИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Демин А.В.¹, Демина Г.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>, alexei_demin@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Выявление оптимальных режимов для автотермического и аллотермического способов газификации растительной биомассы с точки зрения энергетических параметров генераторных газов, а также определение экологических показателей при последующем сжигании генераторных газов для получения тепловой энергии. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* При моделировании процессов газификации использована нестехиометрическая модель, основанная на предположении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь находится в состоянии термодинамического и химического равновесия, которому соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала. При моделировании горения генераторного газа в смеси с воздухом использована кинетическая модель проточного реактора идеального смешения и учитывается детальный механизм химического взаимодействия для реагирующей системы C-H-O-N-S. Теплота сгорания генераторного газа, полученного при паровой газификации и внешнем подводе тепловой энергии существенно выше, чем теплота сгорания газа, полученного при внутреннем подводе тепловой энергии. Однако значения энергетического потенциала и термохимического КПД весьма близки для обоих типов газификации. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Для растительной биомассы, имеющей заданный осредненный элементный состав, определены условия газификации, способствующие повышению степени конверсии исходных материалов в генераторный газ. В частности, для автотермического способа газификации максимальные расчетные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД получены при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,32$. Для аллотермического способа газификации максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД соответствует диапазон температуры газификации $T \approx 1050-1100$ К и массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} \approx 0,217$. Для обеспечения этих условий потребуются подвод тепловой энергии за счет сжигания ≈ 37 масс. % генераторного газа. Генераторный газ, полученный аллотермическим способом, имеет более высокие энергетические показатели, а негативное воздействие на окружающую среду при его последующем сжигании характеризуются меньшими удельными выбросами CO и CO₂ в пересчете на тонну условного топлива.

Ключевые слова: биомасса; газификация; генераторный газ; горение; моделирование; численные исследования.

Для цитирования: Демин А.В., Демина Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, № 6. С.143-152. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF THERMAL UTILIZATION OF WASTE WITH EXTERNAL AND INTERNAL SUPPLY OF THERMAL ENERGY

AV. Demin¹, GV. Demina²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>, alexei_demin@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Identification of optimal regimes for autothermal and allothermic methods of gasification of plant biomass in terms of energy parameters of generator gases, as well as determination of environmental indicators during subsequent combustion of generator gases to obtain thermal energy. *METHODS.* When modeling gasification processes, a non-stoichiometric model was used, based on the assumption that a chemically reacting multicomponent mixture is in a state of thermodynamic and chemical equilibrium, which corresponds to the minimum value of the isobaric-isothermal potential. When modeling the combustion of generator gas in a mixture with air, a kinetic model of a perfectly mixed flow reactor was used and the detailed mechanism of chemical interaction for the C-H-O-N-S reacting system was taken into account. The calorific value of generator gas obtained by steam gasification and external supply of thermal energy is significantly higher than the calorific value of gas obtained by internal supply of thermal energy. However, the values of the energy potential and thermochemical efficiency are very close for both types of gasification. *RESULTS.* For plant biomass with a given averaged elemental composition, gasification conditions are determined that increase the degree of conversion of initial materials into generator gas. In particular, for the autothermal gasification method, the maximum calculated values of the energy potential of dry ash-free generator gas and thermochemical efficiency were obtained at an excess air coefficient $\alpha \approx 0.32$. For the allothermic gasification method, the maximum calculated values of the energy potential of the generator gas and the thermochemical efficiency correspond to the gasification temperature range $T \approx 1050-1100$ K and the mass fraction of the supplied steam $g_{H_2O} \approx 0.217$. To ensure these conditions, it will be necessary to supply thermal energy through combustion of ≈ 37 wt. % generator gas. Generator gas produced by the allothermic method has higher energy performance, and the negative impact on the environment during its subsequent combustion is characterized by lower specific CO and CO₂ emissions in terms of a ton of reference fuel.

Keywords: biomass; gasification; generator gas; combustion; modeling; numerical research.

For citation: Demin AV, Demina GV. Environmental characteristics of thermal utilization of waste with external and internal supply of thermal energy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):143-152. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.

Введение. Литературный обзор

Биомасса считается возобновляемым источником энергии, нейтральным с точки зрения выбросов парниковых газов. Основными методами термохимической конверсии биомассы являются сжигание, пиролиз и газификация. Производство тепловой и электрической энергии за счет сжигания биомассы имеет невысокий коэффициент полезного действия (КПД). Пиролиз позволяет получать смесь высокомолекулярных углеводородов. Определенные ограничения на широкое использование технологий пиролиза накладывает сложность дальнейшей переработки получаемых жидких продуктов. Наиболее перспективными обоснованно считаются технологии газификации биомассы. В результате газификации образуется большое количество газообразных продуктов, содержащих горючие газы (H₂, CO, CH₄ и др.). На эффективность газификации влияют многие факторы, такие как вид газифицирующего агента, массовое соотношение газифицирующего агента и биомассы, начальная влажность биомассы, элементные составы органической и минеральной частей биомассы, конструкция газификатора, режимные характеристики (уровни температуры и давления, производительность) и т. д.

Актуальными научно-техническими задачами при модернизации существующих или создании новых газифицирующих установок являются повышение степени конверсии биомассы в генераторный газ, снижение затрат на осуществление процессов и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Для решения такой комплексной задачи

необходимо применять теоретический анализ наряду с экспериментальными исследованиями. Известны затруднения, связанные с использованием результатов экспериментальных испытаний конкретных конструкций для создания других конструкций, отличающихся видом используемой биомассы и режимными характеристиками. Поэтому изучению процессов термической переработки биомассы и их математическому моделированию уделяется большое внимание [1-14]. Моделирование процессов проводят чаще всего с использованием равновесных или кинетических подходов [1, 5]. Наряду с равновесными и кинетическими моделями находят применение модели на основе методов CFD-моделирования и искусственных нейронных сетей [2, 4, 6, 7, 9, 10].

Газификация биомассы относится к числу перспективных технологий, как с точки зрения энергообеспечения, так и с точки зрения получения водорода и использованию генераторного газа как сырья в химических технологиях [3, 11]. Существенное практическое значение имеет исследование процессов, в целом характерных для пиролиза, газификации и сжигания [8, 12-14].

Следует отметить, что определение равновесного состава является частью многих задач высокотемпературной энергетики и характеризуется большим разнообразием методов расчета. Основы методов расчета термодинамического и химического равновесия представлены в работах А.П. Ваничева, В.П. Глушко, Я.Б. Зельдовича, А.В. Болгарского, В.Е. Алемасова, А.Ф. Дрегаллина и др. Широкому применению равновесных моделей способствовали их основные преимущества: универсальность для различных видов исходных материалов и режимных параметров газификации; независимость от конструкции газификатора; возможность прогнозирования максимально достижимой степени конверсии биомассы.

В данной работе рассматриваются два способа организации процессов газификации биомассы. Первый способ основан на внутреннем подводе к реагирующей системе тепловой энергии, получаемой за счет сжигания части биомассы при значениях коэффициента избытка воздуха $\ll 1$ (далее тип газификации А). Газифицирующим агентом формально является воздух, но фактически – продукты неполного сгорания биомассы. Второй – на внешнем подводе тепловой энергии, получаемой при сжигании части генерируемого газа (далее тип газификации Б). Продукты сгорания горючего газа не смешиваются с продуктами газификации. Тепло, необходимое для газификации передается через внешнюю стенку реактора, а также идет на предварительный нагрев газифицирующего агента – водяного пара.

Основной целью работы является выявление оптимальных режимов для двух выбранных типов газификации с точки зрения энергетических параметров генераторных газов, а также определение экологических показателей при последующем сжигании генераторных газов для получения тепловой энергии.

Новизна результатов исследования заключается в том, что для типичного элементного состава растительной биомассы определены оптимальные режимные параметры газификации, а также проведена сравнительная оценка состава и количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании генераторных газов, полученных двумя наиболее распространенными способами газификации. Принятый подход и полученные результаты имеют практическую значимость при создании или усовершенствовании установок для получения генераторных газов и их использовании в качестве топлива в тепловых энергоустановках.

Материалы и методы

Наиболее доступным ресурсом для производства генераторного газа из возобновляемых источников сырья является растительная биомасса (солома зерновых культур, лузга подсолнечника, древесные отходы, и др.), различные виды которой имеют примерно одинаковый элементный состав. При выполнении исследований принято, что условная биомасса представляет собой механическую смесь органической и минеральной частей с определенным влагосодержанием. Элементный состав условной биомассы был принят на основе анализа и обобщения известных данных [1, 2, 7, 10]. Состав органической части в сухом беззольном состоянии, масс. %: углерод 51,7065; водород 5,2531; кислород 41,8824; сера 0,124; азот 1,034. В составе минеральной части биомассы присутствуют соединения таких макрокомпонентов, как калий, кальций, кремний, магний. При выполнении расчетов учитывались следующие вещества, входящие в состав золы в мелкодисперсном конденсированном состоянии: K_2O , CaO , SiO_2 , MgO . Состав золы, масс. %: калий 9,1251; кальций 24,2055; кремний 22,4723; магний 4,2557; кислород 39,9414. Массовая доля золы и влажность биомассы приняты равными 3 % и 8 %, соответственно. Низшая теплота сгорания биомассы определена по известной формуле Д.И. Менделеева

$Q_n = 16248$ кДж/кг. Давление в реакционном объеме $p = 0,101$ МПа.

При моделировании процессов газификации использована нестехиометрическая модель, основанная на предположении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь находится в состоянии термодинамического и химического равновесия, которому соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала. В конденсированной фазе находятся частицы золы, а также, в зависимости от условий организации процессов, может присутствовать часть углерода. Математическая модель газификации биомассы представлена системой уравнений, включающей нелинейные алгебраические уравнения в логарифмической форме: закон действующих масс (диссоциации); уравнения сохранения вещества; уравнение, устанавливающее равенство давления смеси и суммарного числа молей веществ; уравнение сохранения энергии [15].

При моделировании горения генераторного газа в смеси с воздухом использована кинетическая модель проточного реактора идеального смешения [16], согласно которой химическое взаимодействие в газовой фазе подчиняется основным положениям химической кинетики, в том числе закону действующих масс. Все химические превращения происходят в виде независимых друг от друга элементарных реакций, а механизм химического взаимодействия представлен совокупностью таких элементарных химических реакций. Для реагирующей многокомпонентной газовой смеси, состоящей из исходных реагентов, промежуточных и конечных продуктов сгорания (Ar, O, H, N, C, S, CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O, H₂S, N₂, O₂, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CH₃, CH₂, CH, C₂H, C₂H₃, C₂H₅, H₂CO, HCO, HC₂O, N₂H₂, N₂H, NH₃, NH₂, NH, HNO, HCN, CN, NCO, NO₂, N₂O, HS, HO₂, OH, NO, S₂, SO, SO₂, SO₃), механизм химического взаимодействия включал 185 элементарных обратимых реакций. Сведения о химических реакциях были выбраны из базы данных [17].

Эффективность процессов газификации оценивалась с использованием следующих показателей:

$M_{\text{ш}}$ – общая масса продуктов газификации, включающих газообразные вещества и конденсированную фазу, кг;

M – масса сухого обеззоленного газа, получаемого при переработке 1 кг биомассы, кг/кг биомассы;

$h_{\text{ш}}$, h_6 – удельные массовые энтальпии продуктов газификации при температуре газификации и биомассы при начальной температуре 293 К, кДж/кг, соответственно;

H_r – низшая теплота сгорания сухого обеззоленного генераторного газа, кДж/кг;

$m = M_{\text{ш}}(h_{\text{ш}} - h_6) / H_r$ – масса сухого обеззоленного газа, тепловая энергия которого используется для осуществления процессов газификации 1 кг биомассы, кг/кг биомассы (для газификации типа А $m = 0$);

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса водяного пара, используемого при газификации 1 кг биомассы, кг/кг биомассы;

$g_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} / (1 + m_{\text{H}_2\text{O}})$ – массовая доля водяного пара, используемого для газификации 1 кг биомассы;

$Q = (M - m) \cdot H_r$ – энергетический потенциал сухого обеззоленного газа, полученного при переработке 1 кг биомассы, кДж;

$\eta = H_r \cdot (M - m) \cdot 100 / Q_n$ – термохимический КПД газификации биомассы, %.

Потери тепловой энергии не учитывались. Таким образом, полученные оценки основных показателей близки к своим идеальным теоретически достижимым значениям.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты прогнозирования состава и параметров генераторного газа при газификации типа А приведены в табл. 1. Состав, значения удельной теплоты сгорания и масса получаемого газа приведены для сухого обеззоленного состояния.

Изменение концентраций газообразных веществ и основных параметров генераторного газа соответствуют известным закономерностям, например, [1, 10].

Характерный максимум концентрации СО выявлен при $\alpha \approx 0,32$. С увеличением коэффициента избытка окислителя концентрация H₂ снижается, а концентрация N₂ повышается. Кроме того, при значениях $\alpha \leq 0,31$ в продуктах газификации присутствует углерод в конденсированном состоянии; массовая доля твердого углерода при $\alpha = 0,31$ составляет 3,7 %, а при $\alpha = 0,30$ – 8,2 %. Максимальные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД процессов

газификации наблюдаются при $\alpha = 0,32$.

Таблица 1

Состав и параметры генераторного газа при различных значениях коэффициента избытка воздуха

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Коэффициент избытка воздуха α				
	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
CO, об. %	25,2967	25,7151	26,0377	25,9304	25,7885
H ₂ , об. %	21,0331	20,6933	20,4186	20,2896	19,894
CH ₄ , об. %	0,74615	0,6970	0,59852	0,29611	0,11829
H ₂ S, об. %	0,0339	0,0331	0,0323	0,0318	0,0314
CO ₂ , об. %	10,0489	9,7049	9,4008	9,2654	9,1742
N ₂ , об. %	42,5606	42,8697	43,2188	43,885	44,6824
H _r , кДж/кг	5335	5325	5295	5158	5020
M, кг/кг биомассы	2,4581	2,5257	2,5895	2,6345	2,6774
Q, кДж	13115	13449	13711	13590	13442
η , %	80,71	82,77	84,39	83,64	82,73

При исследовании процессов газификации типа Б, на основании предварительных расчетов, были установлены температурные диапазоны ($T = 1000$ - 1260 К) и количества водяного пара ($q_{H_2O} = 0,195$ - $0,314$), при которых достигается достаточно высокая эффективность газификации, оцениваемая по наибольшим значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД. Основные результаты прогнозирования состава и параметров генераторного газа приведены в табл. 2 – 4. Данные показаны для трех различных значений массы пара, участвующего в реакциях газификации.

Таблица 2

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,24324$ кг/кг биомассы)

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T, К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,051	44,719	47,012	47,5005	47,8121
H ₂ , об. %	49,9576	49,5023	49,6238	50,2194	50,2963
CH ₄ , об. %	2,1853	1,3865	0,7361	0,1709	0,0357
H ₂ S, об. %	0,0510	0,0469	0,0448	0,0442	0,04419
CO ₂ , об. %	7,2679	3,897	2,1555	1,642	1,3895
N ₂ , об. %	0,48629	0,44737	0,42704	0,4221	0,42153
H _r , кДж/кг	15812	16507	16858	16933	16981
m, кг/ кг биомассы	0,35272	0,38267	0,40457	0,42092	0,43459
M, кг/ кг биомассы	1,0735	1,1474	1,1855	1,1865	1,1848
Q, кДж	11396	12624	13165	12963	12740
η , %	70,14	77,69	81,02	79,78	78,40

Таблица 3

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,27778$ кг/кг биомассы)

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T, К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,0671	44,7085	45,4774	46,0961	46,5584
H ₂ , об. %	49,9738	49,5431	50,4729	50,7838	50,7369
CH ₄ , об. %	2,1834	1,3714	0,4875	0,1013	0,0206
H ₂ S, об. %	0,0487	0,0448	0,0440	0,0437	0,0438
CO ₂ , об. %	7,2614	3,9037	3,0976	2,557	2,2217
N ₂ , об. %	0,4647	0,4276	0,4198	0,4173	0,4178
H _r , кДж/кг	15820	16511	16622	16715	16786
m, кг/кг биомассы	0,36747	0,39877	0,41457	0,42947	0,44271
M, кг/кг биомассы	1,1243	1,2005	1,2023	1,2003	1,1965
Q, кДж	11974	13237	13093	12883	12653
η , %	73,69	81,47	80,58	79,29	77,88

Таблица 4

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,31429$ кг/кг биомассы)					
Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T , К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,0905	43,1176	43,9417	44,6903	45,3054
H ₂ , об. %	49,9905	50,5267	51,1778	51,2982	51,1669
CH ₄ , об. %	2,1794	1,0374	0,347	0,0703	0,0141
H ₂ S, об. %	0,0465	0,0439	0,0434	0,0433	0,0434
CO ₂ , об. %	7,2484	4,8542	4,0755	3,4843	3,0552
N ₂ , об. %	0,44379	0,4193	0,41389	0,41299	0,41418
H_f , кДж/кг	15831	16269	16386	16498	16592
m , кг/кг биомассы	0,38326	0,40987	0,42402	0,43786	0,45105
M , кг/кг биомассы	1,1782	1,219	1,2184	1,2139	1,2084
Q , кДж	12585	13162	13016	12803	12565
η , %	77,45	81,01	80,11	78,80	77,33

Анализ полученных результатов позволил определить оптимальные режимы процессов паровой газификации, соответствующие максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимическому КПД (см. табл. 3): температурный диапазон $T = 1050-1100$ К; массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} = 0,217$.

При температурах газификации $T \leq 1000$ К в продуктах газификации отмечено наличие конденсированного углерода. Например, при температуре $T = 1000$ К массовые доли конденсированного углерода: $g_C = 4,8$ % при $g_{H_2O} = 0,195$; $g_C = 3,2$ % при $g_{H_2O} = 0,217$; $g_C = 1,6$ % при $g_{H_2O} = 0,314$.

Из результатов расчетов следует, что теплота сгорания генераторного газа, полученного при паровой газификации и внешнем подводе тепловой энергии существенно выше, чем теплота сгорания газа, полученного при внутреннем подводе тепловой энергии. Однако значения энергетического потенциала и термохимического КПД весьма близки для обоих типов газификации.

Далее моделировались условия в камере сгорания при сжигании смеси воздуха и сухого генераторного газа, очищенного от конденсированной фазы, при различных коэффициентах избытка воздуха. Для вычислительных экспериментов были выбраны два варианта исходных данных по составу генераторных газов: 1 – генераторный газ, полученный при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0,32$ (см. табл. 1, тип генераторного газа А); 2 – генераторный газ, полученный при температуре $T = 1050$ К и массовой доле подводимого пара $g_{H_2O} = 0,217$ (см. табл. 3, тип генераторного газа Б).

Для двух типов генераторного газа в табл. 5, 6 приведены некоторые из результатов выполненных расчетов основных характеристик продуктов сгорания, включая выбросы таких загрязняющих веществ, как CO, CO₂, NO₂, SO₂.

Таблица 5

Параметры продуктов сгорания при различных значениях коэффициента избытка воздуха (тип генераторного газа А)				
Параметры	Значения параметров			
Коэффициент избытка воздуха α	1,0	1,2	1,4	1,6
Температура продуктов сгорания T , К	1950	1858	1746	1644
Массовое соотношение воздуха и генераторного газа	1,3978	1,6773	1,9569	2,2364
Масса продуктов сгорания при сжигании одной тонны генераторного газа, т	2,3978	2,6773	2,9569	3,2364
Выбросы CO, кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	22,351	5,5452	2,1778	1,3799
Выбросы CO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	620,7	647,69	652,87	653,78
Выбросы NO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	0,383	0,316	0,138	0,074
Выбросы SO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	0,856	0,857	0,857	0,857

Таблица 6

Параметры продуктов сгорания при различных значениях коэффициента избытка воздуха (тип генераторного газа Б)				
Параметры	Значения параметров			
Коэффициент избытка воздуха α	1,0	1,2	1,4	1,6
Температура продуктов сгорания T , К	2323	2202	2050	1900
Массовое соотношение воздуха и генераторного газа	4,4206	5,3047	6,1889	7,073

Продолжение таблицы 6

Масса продуктов сгорания при сжигании одной тонны генераторного газа, т	5,4206	6,3047	7,1889	8,073
Выбросы CO, кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	87,359	13,889	2,262	1,139
Выбросы CO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	1266,7	1386	1406,3	1403,2
Выбросы NO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	21,975	20,687	6,854	1,615
Выбросы SO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	1,834	1,839	1,841	1,835

Изменение массовых долей указанных веществ в продуктах сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха приведено на рис. 1, 2.

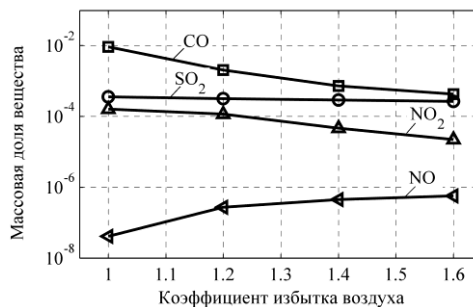


Рис. 1. Массовые доли загрязняющих веществ в продуктах сгорания генераторного газа (тип А) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Fig. 1. Mass fractions of pollutants in the combustion products of generator gas (type A) depending on the coefficient of excess air

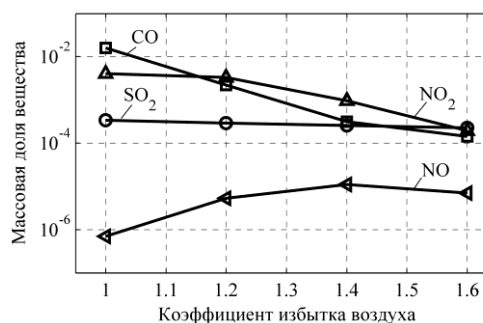


Рис. 2. Массовые доли загрязняющих веществ в продуктах сгорания генераторного газа (тип Б) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Fig. 2. Mass fractions of pollutants in the combustion products of generator gas (type B) depending on the coefficient of excess air

Из приведенных результатов видно, что для сжигания генераторного газа типа Б требуется большее количество воздуха, чем для сжигания генераторного газа типа А, поэтому и удельные показатели выбросов в пересчете на одну тонну сжигаемых газов выше для газа типа Б, по сравнению с такими же показателями для газа типа А. Однако сравнение экологических показателей продуктов сгорания для двух исследуемых типов генераторного газа наиболее целесообразно проводить по удельным показателям выбросов в пересчете на одну тонну условного топлива (табл. 7).

Таблица 7

Удельные выбросы загрязняющих веществ					
Тип генераторного газа	Вещество	Массовый выброс вещества, кг/т у. т., при различных значениях коэффициента избытка воздуха α			
		$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$
А	NO _x	2,118	1,748	0,766	0,411
	SO ₂	4,741	4,745	4,745	4,742
	CO	123,68	30,684	12,051	7,636
	CO ₂	3434,6	3584	3612,6	3617,6
Б	NO _x	48,64	45,789	15,172	3,575
	SO ₂	4,059	4,071	4,0767	4,063
	CO	193,37	30,744	5,007	2,523
	CO ₂	2803,8	3067,8	3112,7	3105,9

В камерах сгорания тепловых энергоустановок сжигание горючих газов, как правило, осуществляется при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,2-1,4$. В таких условиях более высокий уровень температур характерен для горения генераторного газа типа Б, следствием этого являются и более высокие концентрации оксидов азота. Для их снижения разработаны и успешно применяются соответствующие способы организации рабочих процессов, например, ступенчатый подвод воздуха, нестехиометрическое сжигание и оптимизация времени пребывания реагирующей смеси в камере сгорания.

Из анализа приведенных в табл. 7 расчетных данных следует, что с точки зрения выбросов СО и СО₂ практическое использование для получения тепловой энергии генераторного газа типа Б будет оказывать меньшее негативное воздействие на окружающую среду, чем использование генераторного газа типа А.

Заключение

Выполнены численные исследования процессов газификации растительной биомассы при внутреннем и внешнем подводе тепловой энергии и разных типах газифицирующих агентов.

Для растительной биомассы, имеющей заданный осредненный элементный состав, определены условия газификации, способствующие повышению степени конверсии исходных материалов в генераторный газ.

В частности, для автотермического способа газификации максимальные расчетные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД получены при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,32$.

Для аллотермического способа газификации максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД соответствует диапазон температуры газификации $T \approx 1050-1100$ К и массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} \approx 0,217$. Для обеспечения этих условий потребуется подвод тепловой энергии за счет сжигания ≈ 37 масс. % генераторного газа.

Генераторный газ, полученный аллотермическим способом, имеет более высокие энергетические показатели, а негативное воздействие на окружающую среду при его последующем сжигании характеризуются меньшими удельными выбросами СО и СО₂ в пересчете на тонну условного топлива.

Литература

1. Puig-Arnavat M., Bruno J. C., Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. pp. 2841-2851. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.030.
2. Dipal Baruah, Baruah D.C. Modeling of biomass gasification: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V. 39. pp. 806 – 815. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.129.
3. Farzad S., Mandegari M., Görgens J. A Critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments // *Biofuel Research Journal*. 2016. V. 3(4). pp. 483 – 495. doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
4. Aydinli B., Caglar A., Pekol S., et al. The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network // *Energy Exploration & Exploitation*. 2017. V. 35(6). pp. 698 712. doi: 10.1177/2F0144598717716282.
5. Safarian S., Unnþórsson R., Richter C. A review of biomass gasification modelling // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 110. pp. 378 – 391. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.003.
6. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
7. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
8. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasiri B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // *Biofuel Research Journal*. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
9. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
10. Ajourloo M., Ghodrat M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // *Journal of the Energy Institute*. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

11. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. Is. 34. P. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
12. Павлов Г.И., Ахметшина А.И., Сабирзянов А.Н., и др. Разработка расчетной схемы камеры сгорания для сжигания щепы старых шпал // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 3-13.
13. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. № 6. С. 68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.
14. Донской И.Г. Математическое моделирование газификации древесины с разложением смолистых продуктов на частицах активных компонентов // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.
15. Демин А.В. Оценка экологичности и эффективности процессов газификации биомассы // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2021. № 1. С. 40-50. doi:10.17277/voprosy.2021.01.pp.040-050.
16. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., et al. *Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications*. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
17. NIST Chemical Kinetics Database / J.A. Manion, R.E. Huie, R. D. Levin et al // *NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8, Data version 2022*. – Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology, 2022. Доступно по: <http://kinetics.nist.gov>. Ссылка активна на 10 июня 2022.

Авторы публикации

Демин Алексей Владимирович – профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет.

Демина Галина Владимировна – доцент кафедры «Ботаника и физиология растений», Казанский федеральный университет.

References

1. Puig-Arnavat M., Bruno J. C., Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14:2841-2851. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.030.
2. Dipal Baruah, Baruah D.C. *Modeling of biomass gasification: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:806-815. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.129.
3. Farzad S, Mandegari M, Görgens JA Critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal*. 2016;3(4):483-495. doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
4. Aydinli B, Caglar A, Pekol S, et al. The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network. *Energy Exploration & Exploitation*. 2017;35(6):698-712. doi: 10.1177%2F0144598717716282.
5. Safarian S, Unnpórrsson R, Richter C. *A review of biomass gasification modelling*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;110:378-391. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.003.
6. Ramos A, Monteiro E, Rouboa A. *Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;110:188-206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
7. Mazaheri N, Akbarzadeh AH, Madadian E, et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. *Energy Conversion and Management*. 2019;183:671-688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
8. Perera S, Wickramasinghe C, Samarasinghe B, et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review. *Biofuel Research Journal*. 2021;8(4):1481-1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
9. Kushwah A, Reina TR, Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview. *Science of the Total Environment*. 2022;834:155243. doi: 10.1016/j.scitotenv. 2022.155243.
10. Ajorloo M, Ghodrat M, Scott J, et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation. *Journal of the Energy*

Institute. 2022;102:395-419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

11. Tezer Ö, Karabağ N, Öngen A, et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(34):15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158

12. Pavlov GI, Akhmetshina AI, Sabirzyanov AN, et al. Development of the design scheme of the combustion chamber for burning of wood chips the old sleepers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-3-13>.

13. Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

14. Donskoy IG. *Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles*. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018;20(11-12):107-117. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.

15. Demin AV. Evaluation of environmental friendliness and efficiency of biomass gasification processes. Problems of contemporary science and practice. *Vernadsky university*. 2021;1(79):40-50. doi:10.17277/voprosy.2021.01.pp.040-050.

16. Naoumov VI, Krioukov VG, Abdullin AL, et al. *Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications*. Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714.

17. Manion JA, Huie RE, Levin RD, et al. *NIST Chemical Kinetics Database*. NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8, Data version 2022. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2022. Available at: <http://kinetics.nist.gov>. Accessed: 10 Jun 2022.

Authors of the publication

Alexey V. Demin – Professor of the Department «Engineering ecology and labor safety» of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Galina V. Demina – Associate Professor of the Department «Botany and Plant Physiology» of Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Получено 22.11.2022г.

Отредактировано 28.11.2022г.

Принято 02.12.2022г.