

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

А. В. Демин

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Г. Крюков

Ключевые слова: биомасса; газификация; горение; синтез-газ; численные исследования.

Аннотация: Представлены результаты численных исследований газификации биомассы: подстилочных пометных масс птицеводства, иловых осадков сточных вод, отходов деревообработки. Предложена принципиальная схема установки газификации с использованием тепловой энергии, получаемой при сжигании определенной части генерируемого синтез-газа. Определены оптимальные режимные параметры паровой газификации, способствующие повышению степени конверсии углерода в монооксид углерода и водород, а также режимные параметры сжигания смеси воздуха и части генерируемого синтез-газа, способствующие минимальному содержанию в продуктах сгорания вредных веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух.

Введение

Применение продуктов газификации биомассы в энергоустановках малой мощности позволяет получать тепловую и электрическую энергию, снижать вредные выбросы, утилизировать углеродсодержащие отходы, которые относятся к возобновляемым альтернативным источникам энергии. Утилизация биомассы приводит к снижению площадей территорий, необходимых для размещения отходов, уменьшает загрязнение окружающей среды.

Повышение эффективности процессов газификации биомассы является сложной научной и технической проблемой. Основная цель газификации – получение смеси горючих газов (CO , H_2 , CH_4 и др.). Газификация применяется как для исходных углеродсодержащих материалов, так и для продуктов пиролиза [1 – 4]. Тепловая энергия, необходимая для газификации исходных материалов, чаще всего получается при сжигании части биомассы при подводе предварительно нагретого воздуха, в количестве

Демин Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», e-mail: alexei_demin@mail.ru, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия.

существенно меньшего стехиометрического, теоретически необходимого для полного сгорания. В этом случае в продуктах газификации (синтез-газе) присутствуют такие продукты горения как CO_2 , H_2O и молекулярный азот N_2 . При повышении концентрации N_2 существенно снижается удельная теплота сгорания синтез-газа. При последующем сжигании синтез-газа возрастают выбросы оксидов азота NO_x . Исключить высокое содержание N_2 и продуктов сгорания в синтез-газе можно, применяя в качестве газифицирующего агента высокотемпературный пар и осуществляя внешний нагрев реакционных объемов газификатора. Тепловую энергию для этого целесообразно получать при сжигании определенной части генерируемого синтез-газа.

При разработке новых конструкций газификаторов основной научно-технической проблемой является повышение степени конверсии биомассы в горючие газообразные продукты. Решение данной задачи может быть получено только на основе теоретического анализа численных и экспериментальных исследований всего сложного комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов газификации биомассы. В настоящее время численным исследованиям на основе математических моделей процессов термической утилизации биомассы уделяется большое внимание. Математическое моделирование может быть использовано для прогнозирования состава и свойств как продуктов газификации, так и продуктов сгорания синтез-газа. При моделировании процессов используются, главным образом, два подхода – равновесный и кинетический [1, 5 – 10]. Равновесный подход основан на предположении, что реагирующая многокомпонентная система находится в состоянии термодинамического и химического равновесия; кинетический – на моделировании химических преобразований в реагирующей системе с учетом конечных скоростей элементарных химических реакций. Оба подхода могут быть использованы и совместно для моделирования процессов в различных реакционных зонах газификаторов.

Чаще всего состояние термодинамического равновесия описывают, применяя соответствующие математические модели двух типов. В моделях первого типа (стехиометрических) для расчета состава химически реагирующей смеси используют константы равновесия реакций газификации биомассы; второго типа (нестехиометрических) – принято, что при термодинамическом и химическом равновесии свободная энергия Гиббса имеет минимальное значение.

При моделировании процессов газификации в данной работе использована модель второго типа и приняты следующие основные допущения: углерод, содержащийся в биомассе, преобразуется в газообразные продукты, а также может присутствовать в реагирующей системе в мелкодисперсной конденсированной фазе; зольные частицы входят в состав конденсированной фазы, являются инертными и не участвуют в реакциях газификации; для газовой фазы справедливо уравнение состояния идеального газа; градиенты параметров состояния реагирующей смеси внутри реакционного объема отсутствуют. Математическая модель для расчета продуктов газификации биомассы представлена системой уравнений, включающей нелинейные алгебраические уравнения в логарифмической фор-

ме: закон действующих масс (диссоциации); уравнения сохранения вещества; уравнение, устанавливающее равенство давления смеси и суммарного числа молей веществ [11].

При моделировании процессов горения смеси синтез-газа и воздуха использован кинетический подход [12]. Принято, что поступающие в локальную зону течения в камере сгорания реагенты мгновенно перемешиваются с компонентами, уже находящимися в данной зоне; химическое взаимодействие подчиняется основным положениям химической кинетики, в том числе закону действующих масс; все превращения происходят в виде независимых друг от друга элементарных реакций; механизм химического взаимодействия представлен совокупностью таких элементарных химических реакций.

Материалы и методы исследования

В качестве углеродсодержащих отходов рассматривались различные виды биомассы: подстилочные пометные массы (ППМ) птицеводства, иловые осадки сточных вод (ОСВ), стружка сосны как отходы деревообработки (ОД). На рисунке 1 представлен способ организации процессов газификации.

При первоначальном запуске установки воздух и пусковой природный газ подаются в камеру сгорания (КС). При эксплуатации установки на стационарном режиме в камеру сгорания поступает сухой очищенный от зольных частиц синтез-газ. Вода и высокотемпературные продукты сгорания поступают в парогенератор, в котором часть тепловой энергии продуктов сгорания за счет теплопередачи через сплошную поверхность, герметично разделяющую теплоносители, используется на нагрев и испарение воды. После парогенератора продукты сгорания и пар поступают

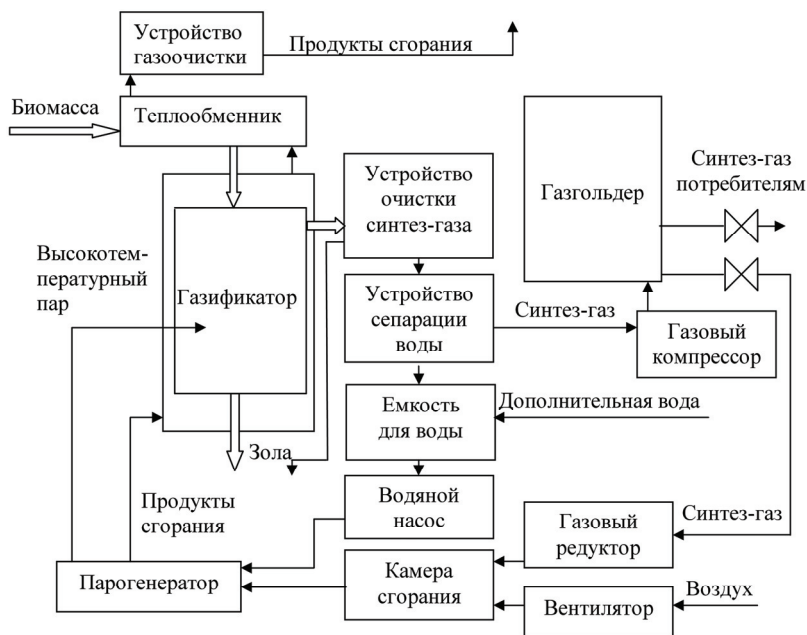


Рис. 1. Принципиальная схема установки газификации

непосредственно в газификатор. После прогрева реакционной зоны газификатора до рабочих температур в него дозировано периодически загружается биомасса, которая предварительно нагревается в теплообменнике за счет остаточного тепла продуктов сгорания. Охлажденные продукты сгорания проходят через устройство газоочистки и выбрасываются в атмосферу. Получаемый в газификаторе синтез-газ поступает в устройство очистки от взвешенной дисперсной фазы, затем – в устройство сепарации для удаления воды. Сухой обеззоленный синтез-газ с помощью газового компрессора закачивается в газгольдер, из которого одна его часть используется для осуществления процессов газификации, другая – подается потребителям.

В данной работе биомасса рассматривается как механическая смесь органической и минеральной частей с определенным влагосодержанием. Характерной особенностью биомассы является широкий диапазон изменения элементного состава органической и минеральной частей. В наибольшем количестве в органической части биомассы присутствуют углерод и кислород; в меньшем – водород, азот и сера. Химические составы различных видов биомассы принимались на основании анализа и обобщения известных данных, например [4, 13, 14].

При выполнении расчетов использовали химические составы органических и минеральных частей биомассы в сухом беззольном состоянии, представленные в табл. 1, при этом учитывались следующие вещества, входящие в состав зольного остатка и находящиеся в мелкодисперсном конденсированном состоянии: SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , P_2O_5 , K_2O .

Таблица 1

**Химический состав органической
и минеральной частей биомассы, масс. %**

Химический элемент	ППМ	ОСВ	ОД
<i>Органическая</i>			
C	46,30	58,77	52,56
H	8,13	6,41	6,11
O	38,82	26,72	41,13
N	5,47	7,23	0,06
S	1,27	0,87	0,02
<i>Минеральная</i>			
Si	4,5414	26,5976	17,9295
Ca	14,8319	5,1878	19,1766
Al	1,2063	4,2496	6,5585
Fe	0,9733	3,1216	5,7281
Mg	3,617	1,276	2,4692
Na	8,1869	8,6959	1,359
P	12,7744	3,5645	0,89353
K	16,2319	1,1077	5,1882
O	37,6368	46,1992	40,6974

Содержание минеральных частей в составе сухой биомассы принималось равным 20, 25 и 1 масс.% для ППМ, ОСВ и ОД соответственно. Суммарное количество воды W принималось в зависимости от содержания углерода в органической части биомассы из условия, что для полной газификации 1 моля углерода необходим 1 моль H_2O с учетом влагосодержания исходного материала.

Таким образом, массовые доли органической части $g_1 = (1 - A)(1 - W)$, где A – массовая доля минеральной части для сухого состояния биомассы, W – массовая доля воды; минеральной – $g_2 = A(1 - W)$. Значения массовых долей органической, минеральной частей и воды, принятые при выполнении расчетов, приведены в табл. 2.

Количество тепловой энергии Q , необходимое для нагрева исходных материалов, испарения воды и нагрева пара до уровня рабочих температур, определялось по формуле

$$Q = m_6(h_T - h_6),$$

где m_6 – суммарное количество сухой биомассы и воды, кг; h_T – удельная массовая энтальпия продуктов газификации, включая зольные частицы, при температуре газификации, кДж/кг; h_6 – удельная массовая энтальпия смеси сухой биомассы и всего количества воды в жидком состоянии при начальной температуре для ППМ, ОСВ и ОД, кДж/кг: –9395, –10134 и –9180 соответственно.

Принято, что тепловая энергия для осуществления газификации получается при сжигании части генерируемого синтез-газа. Количество продуктов сгорания $m_{п.с}$ синтез-газа определялось по формуле

$$m_{п.с} = Q / (h_{п.с1} - h_{п.с2}),$$

где $h_{п.с1}$, $h_{п.с2}$ – значения удельной массовой энтальпии продуктов сгорания синтез-газа на входе в парогенератор и на выходе из теплообменника соответственно, кДж/кг (см. рис. 1.).

Количество синтез-газа $m_{с-г}$, сжигаемого для этой цели при заданном коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{ок}$, определялось по формуле

$$m_{с-г} = m_{п.с} / (1 + \alpha_{ок} k_m^0),$$

где k_m^0 – массовое стехиометрическое соотношение окислителя и горючего.

Таблица 2

Массовые доли органической, минеральной частей и воды

Массовая доля	ППМ	ОСВ	ОД
g_1	0,51427	0,45149	0,55602
g_2	0,12857	0,15050	0,00562
W	0,35716	0,39801	0,43837

При сжигании смеси воздуха и синтез-газа в составе продуктов сгорания учитывались исходные реагенты, промежуточные и конечные продукты 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. Химический механизм содержал 182 обратимые элементарные реакции, для которых константы скоростей выбирались с учетом данных, приведенных в [15].

Полнота сгорания η определялась по формуле

$$\eta = 1 - (T^{\text{ад.с}} - T) / T^{\text{ад.с}},$$

где $T^{\text{ад.с}}$, T – температуры продуктов при адиабатическом сгорании и на выходе из КС соответственно, К.

Результаты и их обсуждение

В таблице 3 приведены некоторые из результатов расчетов паровой газификации биомассы при различных температурах в реакционных объемах: удельная массовая энтальпия продуктов газификации h_T ; массовая доля паров воды в продуктах газификации, когда часть исходного количества воды израсходована в химических процессах, $g_{\text{H}_2\text{O}}$; массовая доля $g_{\text{с.-г}}$ и низшая теплота сгорания $H_u^{\text{с.-г}}$ сухого синтез-газа, кДж/кг, а также состав сухого обеззоленного синтез-газа, об. %.

Изменения концентраций горючих газов в продуктах газификации биомассы соответствуют известным закономерностям. При увеличении температуры возрастает содержание CO и H₂ и уменьшается содержание CH₄.

На следующем этапе численных исследований моделировались условия в КС при сжигании смеси воздуха и сухого очищенного от конденсированной фазы синтез-газа. Состав синтез-газа принят по результатам расчетов процессов газификации при температурах более 1200 К. Массовые стехиометрические соотношения окислителя и горючего k_m^0 для синтез-газов, полученных при газификации ППМ, ОСВ и ОД, имели следующие значения: 4,5525; 4,6693 и 4,3834 соответственно.

На основе предварительных расчетов получено, что приемлемый уровень температур и массовый расход продуктов сгорания, тепловая энергия которых используется в процессах газификации, достигается при значениях коэффициента окислителя $\alpha_{\text{ок}} \geq 1,6$. Сжигание синтез-газа моделировалось для двух стадий, при организации первичной и вторичной зон горения. В первичной зоне прогнозирование параметров продуктов сгорания выполнялось при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{\text{ок}} = 0,9$. При этом в основном ядре потока в цилиндрической КС характерны условия, способствующие уменьшению концентрации кислорода и снижению скорости образования оксидов азота. Избыточный воздух используется для организации пристеночных зон, защищающих от перегрева внутренние поверхности КС, и организации вторичной зоны при суммарном значении $\alpha_{\text{ок}} = 1,6$ в выходном сечении КС. Таким образом, процессы горения осуществляются при уровнях температур, обеспечивающих снижение эмиссии оксидов азота.

Параметры и состав синтез-газа, полученного из ППМ, ОСВ, ОД

Температура газификации, К	Параметр				Состав					
	h_f	g_{H_2O}	g_{c-f}	H_u^{c-f}	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ S	CO ₂	N ₂
ППМ:										
1066	-5850	0,22581	0,64562	16029	24,8868	52,5020	6,5597	0,45980	13,3345	2,2573
1098	-5550	0,21911	0,65232	16193	26,9510	54,7178	4,2811	0,43833	11,4592	2,1525
1136	-5250	0,21390	0,65753	16364	28,8073	56,5364	2,3707	0,42071	9,7980	2,0669
1191	-4950	0,21219	0,65924	16558	30,5186	57,7927	0,94394	0,40854	8,3279	2,0084
1275	-4650	0,21676	0,65467	16795	32,1050	58,2063	0,21873	0,40449	7,0753	1,9902
ОСВ:										
1074	-5750	0,15076	0,69874	16661	29,8892	47,6191	8,8234	0,27431	10,7940	2,6001
1108	-5400	0,14256	0,70694	16851	32,1039	50,5088	5,9917	0,25918	8,6794	2,4570
1142	-5100	0,13551	0,71399	16996	33,7002	52,6627	3,8947	0,24789	7,1439	2,3506
1184	-4800	0,12935	0,72015	17133	35,0760	54,4628	2,1320	0,23846	5,8288	2,2619
1244	-4500	0,12583	0,72367	17270	36,2591	55,7393	0,83031	0,23176	4,7400	2,1996
ОД:										
1079	-5480	0,19252	0,80186	15573	29,98	50,14	6,19	0,00071	13,65	0,0235
1109	-5180	0,18792	0,80646	15754	31,87	52,19	4,12	0,00068	11,78	0,0226
1146	-4880	0,18429	0,81010	15932	33,57	53,92	2,37	0,00066	10,1209	0,0218
1197	-4580	0,18335	0,81104	16125	35,17	55,16	1,01	0,00064	8,65	0,0214
1276	-4280	0,18758	0,80680	16345	36,70	55,63	0,26	0,00063	7,39	0,0213

Таблица 4

**Содержание и относительное количество вредных веществ
в охлажденных продуктах сгорания**

Вид биомассы	Мольные доли вещества $r_i \times 10^6$				Количество вещества, мг на 1кг сухой биомассы		
	CO	SO ₂	NO	NO ₂	CO	SO ₂	NO _x
ППМ	158	994	4	62	676	9728	454
ОСВ	178	552	3	77	959	6795	699
ОД	224	2	2	81	1118	23	675

Одна из задач вычислительных экспериментов – определение оптимального времени пребывания реагирующей смеси в КС. В качестве основных критериев для этого приняты полнота сгорания и концентрации оксидов азота в выходном сечении КС.

По результатам расчетов получено, что полнота сгорания $\eta \geq 0,99$ характерна для времени пребывания $\tau \approx 60$ мс, когда концентрации NO в продуктах сгорания синтез-газа, полученного из ППМ, ОСВ и ОД, составляли 66, 80 и 83 ppm соответственно. При увеличении времени пребывания до 120 мс концентрации NO увеличивались на ~30 %.

Также моделировались условия охлаждения продуктов сгорания при передаче тепловой энергии на осуществление процессов газификации биомассы. Содержание некоторых вредных веществ в продуктах сгорания синтез-газов, полученных из различных видов биомассы, при температуре 298 К приведено в табл. 4.

Количество синтез-газа, необходимого для осуществления процессов паровой газификации, от общего количества генерируемого газа при утилизации ППМ, ОСВ и ОД составило ~ 52, 54 и 44 масс.% соответственно. При выполнении расчетов принималось, что температура продуктов сгорания на выходе из теплообменника, предназначенного для предварительного нагрева биомассы, составляла ~ 600 К. Для исследуемых условий определены количества вредных веществ в продуктах сгорания, используемых для газификации 1 кг сухой биомассы (см. табл. 4).

Полученные данные позволяют обоснованно выбрать способ и устройство для очистки отходящих газов в зависимости от производительности по количеству утилизируемой биомассы.

Заключение

Процессы паровой газификации ППМ, ОСВ и древесных отходов исследованы как функции их химического состава и условий организации рабочих процессов.

Для выбранных условий определены рекомендуемые уровни температуры (~1100 ± 100 К), оптимальные для повышения конверсии биомассы в синтез-газ, имеющий высокие значения удельной теплоты сгорания.

Установлено, что при газификации с внешним подводом тепла целесообразно получать данное тепло при сжигании части генерируемого синтез-газа. Получены оценочные значения количеств синтез-газа, необходи-

мого для этой цели, и предложена принципиальная схема установки газификации биомассы. Эффективность исследованного способа организации процессов получения синтез-газов заключается:

– в получении высококалорийного синтез-газа, в составе которого в наибольших количествах содержатся водород и монооксид углерода, в меньших – диоксид углерода и метан, в минимальных – молекулярный азот, и практически полностью отсутствует водяной пар;

– достижении высокой степени конверсии исходных углеродсодержащих материалов при использовании в качестве газифицирующего агента высокотемпературного пара;

– минимальном содержании токсичных компонентов в продуктах сгорания синтез-газа.

Список литературы

1. Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Volume 2: Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids / Edited by I. Yahyaoui. – Elsevier Science, 2018. – 536 p.

2. Heidenreich, S. Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility / S. Heidenreich, M. Müller, P. U. Foscolo. – Academic Press, 2016. – 140 p.

3. Biomass Gasification on a Downdraft Gasifier with a Two-Stage Air Supply: Effect of Operating Conditions on Gas Quality / A. L. Galindo, E. S. Lora, R. V. Andrade [et al.] // Biomass and Bioenergy. – 2014. – Vol. 61. – P. 236 – 244.

4. Poultry Litter Gasification in a Fluidized Bed Reactor: Effects of Gasifying Agent and Limestone Addition / D. S. Pandey, M. Kwapinska, A. Gómez-Barea [et al.] // Energy & Fuels. – 2016. – Vol. 30. – P. 3085 – 3096.

5. Blanco, A. Modeling and Simulation of Biomass Fast Pyrolysis in a Fluidized Bed Reactor / A. Blanco, F. Chejne // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2016. – Vol. 118. – P. 105 – 114. doi: 10.1016/j.jaap.2016.01.003

6. Modeling of Biomass Thermo-Chemical Gasification Using Artificial Neural Networks / C. C. Sreejith, N. K. Priyak, C. Muraleedharan, P. Arun // International Journal of Applied Engineering Research. – 2012. – Vol. 7, No. 3. – P. 313 – 320.

7. Thermochemical Equilibrium Modelling of Gasifying Process / A. Melgar, J. F. Perez, H. Laget, A. Horillo // Energy Convers. Manag. – 2007. – Vol. 48. – P. 59 – 67.

8. Sreejith, C. C. Equilibrium Modeling and Regression Analysis of Biomass Gasification / C. C. Sreejith, C. Muraleedharan, P. Arun // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2012. – Vol. 4, No. 6. – P. 063124. doi: 10.1063/1.4768545

9. Thermodynamic Modeling and Optimization of Thermolysis and Air Gasification of Waste Tire / A. Mozafari, F. Farshchi Tabrizi, M. Farsi, S. A. H. Seyed Mousavi // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2017. – Vol. 126. – P. 415 – 422. doi: 10.1016/j.jaap.2017.04.001

10. Wang, Y. Kinetic Model of Biomass Gasification / Y. Wang, C. M. Kinoshita // Solar Energy. – 1993. – Vol. 51, No. 1. – P. 19 – 25. doi: 10.1016/0038-092X(93)90037-0

11. Алемасов, В. Е. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках : учеб. пособие / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. С. Черенков. – М. : Химия, 2000. – 520 с.

12. Демин, А. В. Математическое моделирование процессов термической утилизации углеродсодержащих отходов / А. В. Демин, Р. Я. Дыганова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 26 – 30. doi: 10.18412/1816-0395-2018-4-26-30

13. Kosov, V. F. Simulation of a Process for the Two-Stage Thermal Conversion of Biomass into the Synthesis Gas. – Текст : электронный / V. F. Kosov, V. A. Lavrenov, V. M. Zaichenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 653, No. 1. – 6 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/653/1/012031/pdf> (дата обращения: 25.08.2020).

14. Двухстадийная пиролитическая конверсия различных видов биомассы в синтез-газ / В. А. Лавренов, О. М. Ларина, В. А. Синельщиков, Г. А. Сычев // *Теплофизика высоких температур*. – 2016. – Т. 54, № 6. – С. 950 – 956. doi: 10.7868/S0040364416060090

15. NIST Chemical Kinetics Database. – Текст : электронный / 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 2015.12. – Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology, 2020. – URL : <http://kinetics.nist.gov> (дата обращения: 27.08.2020).

References

1. Yahyaoui I. [Ed.] *Advances in Renewable Energies and Power Technologies. Volume 2: Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids*, Elsevier Science, 2018, 536 p.

2. Heidenreich S., Müller M., Foscolo P.U. *Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility*, Academic Press, 2016, 140 p.

3. Galindo A.L., Lora E.S., Andrade R.V. [et al.] Biomass Gasification on a Downdraft Gasifier with a Two-Stage Air Supply: Effect of Operating Conditions on Gas Quality, *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 61, pp. 236-244.

4. Pandey D.S., Kwapinska M., Gómez-Barea A. [et al.] Poultry Litter Gasification in a Fluidized Bed Reactor: Effects of Gasifying Agent and Limestone Addition, *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30, pp. 3085-3096.

5. Blanco A., Chejne F. Modeling and Simulation of Biomass Fast Pyrolysis in a Fluidized Bed Reactor, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, vol. 118, pp. 105-114, doi: 10.1016/j.jaap.2016.01.003

6. Sreejith C.C., Priyak N.K., Muraleedharan C., Arun P. Modeling of Biomass Thermo-Chemical Gasification Using Artificial Neural Networks, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 313-320.

7. Melgar A., Perez J.F., Laget H., Horillo A. Thermochemical Equilibrium Modelling of Gasifying Process, *Energy Convers. Manag.*, 2007, vol. 48, pp. 59-67.

8. Sreejith C.C., Muraleedharan C., Arun P. Equilibrium Modeling and Regression Analysis of Biomass Gasification, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012, vol. 4, no. 6, p. 063124, doi: 10.1063/1.4768545

9. Mozafari A., Farshchi Tabrizi F., Farsi M., Seyed Mousavi S.A.H. Thermodynamic Modeling and Optimization of Thermolysis and Air Gasification of Waste Tire, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 126, pp. 415-422, doi: 10.1016/j.jaap.2017.04.001

10. Wang Y., Kinoshita C.M. Kinetic Model of Biomass Gasification, *Solar Energy*, 1993, vol. 51, no. 1, pp. 19-25, doi: 10.1016/0038-092X(93)90037-0

11. Alemasov V.Ye., Dregalin A.F., Cherenkov A.S. *Osnovy teorii fiziko-khimicheskikh protsessov v teplovykh dvigatelyakh i energeticheskikh ustanovkakh: uchebnoye posobiye* [Fundamentals of the theory of physical and chemical processes in heat engines and power plants: a tutorial], Moscow: Khimiya, 2000, 520 p. (In Russ.)

12. Demin A.V., Dyganova R.Ya. [Mathematical modeling of the processes of thermal utilization of carbon-containing waste], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 4, pp. 26-30, doi: 10.18412/1816-0395-2018-4-26-30 (In Russ.)

13. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/653/1/012031/pdf> (accessed 25 August 2020).

14. Lavrenov V.A., Larina O.M., Sinel'shchikov V.A., Sychev G.A. [Two-stage pyrolytic conversion of various types of biomass into synthesis gas], *Теплофизика высокиx температур* [Thermal physics of high temperatures], 2016, vol. 54, no. 6, pp. 950-956, doi: 10.7868/S0040364416060090 (In Russ., abstract in Eng.)

15. <http://kinetics.nist.gov> (accessed 27 August 2020).

Evaluation of Environmental Friendliness and Efficiency of Biomass Gasification Processes

A. V. Demin

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Keywords: biomass; gasification; combustion; synthesis gas; numerical studies.

Abstract: The results of numerical studies of biomass gasification are presented: litter masses of poultry farming, sewage sludge, woodworking waste. A schematic diagram of a gasification installation using thermal energy obtained by burning a certain part of the generated synthesis gas is proposed. The optimal operating parameters of steam gasification, contributing to an increase in the degree of conversion of carbon into carbon monoxide and hydrogen, as well as operating parameters of combustion of a mixture of air and a part of the generated synthesis gas, contributing to the minimum content of harmful substances emitted into the atmospheric air in combustion products have been determined.

© А. В. Демин, 2021