



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ С РАЗЛОЖЕНИЕМ СМОЛИСТЫХ ПРОДУКТОВ НА ЧАСТИЦАХ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

И.Г. Донской

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Резюме: Работа посвящена численному исследованию процесса обращенной слоевой газификации древесной биомассы. Такие процессы используются для получения горючих газов на установках малой мощности. Для повышения качества генераторного газа предлагается использовать смесь древесного топлива с негорючим материалом, который может проявлять каталитическую активность при разложении нежелательных смолистых продуктов. Добавление негорючего материала снижает теплотворную способность смеси, однако способствует более глубокой очистке газа. Целью исследования является выбор оптимального соотношения «активный материал/древесное топливо» и определение минимальной активности материала, при которой его добавление к топливу становится эффективным.

Ключевые слова: газификация, катализ, древесина, смола, очистка, математическое моделирование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.

Для цитирования: 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.

MATHEMATICAL MODELLING OF WOOD GASIFICATION WITH TARRY PRODUCTS DECOMPOSITION ON ACTIVE MATERIAL PARTICLES

I.G. Donskoy

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Abstract: The work is devoted to the numerical study of the process of downdraft fixed-bed gasification of woody biomass. Such processes are used to produce combustible gases at low-capacity power plants. To improve the quality of the produced gas, it is proposed to use a mixture of wood fuel with a non-combustible material that can exhibit catalytic activity in the decomposition of undesired tarry products. Adding a non-combustible material leads to lower heat value of fuel mixture, but contributes to a deeper gas purification. The aim of the study is to

select the optimal "active material / wood fuel" ratio and to determine the minimum material activity at which its addition to the fuel becomes effective.

Keywords: *gasification, catalysis, wood, tar, gas cleaning, mathematical modeling.*

Acknowledgments: *This work is performed in the course of scientific project III.17.1 of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences fundamental researches program, registration number AAAA-A17-117030310448-0.*

For citation: *I.G. Donskoy. Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 107-117. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.*

Введение

Газификация твердых топлив позволяет получать горючий газ для энергетики и химической технологии. Топливная база газификации – это не только горючие ископаемые (угли и тяжелые углеводороды), но и возобновляемые ресурсы, в первую очередь биомасса и отходы [1].

Одной из основных проблем низкотемпературной газификации является образование смолистых продуктов, которые, кроме снижения химического КПД процесса газификации [2], способствуют также спеканию частиц и загрязнению газового тракта. Способы снижения содержания смолы в генераторном газе можно разделить по стадии, на которой происходит воздействие: перед реакционной зоной газогенератора (получение полукокса, торрефикация [3]); в реакционной зоне (использование ступенчатого дутья [4, 5], катализаторов [6], сорбентов [7, 8], обогащение дутья кислородом [9]), после реакционной зоны (фильтрационная и сорбционная очистка, каталитическая очистка [10–13], термическая обработка газа [14, 15]). Эти способы имеют как преимущества, так и недостатки. Выбор способа смолоочистки зависит от конкретных условий: сырья, аппарата, режима работы, требований к газу [16].

Для снижения выхода смолы при газификации в кипящем слое часто используют активные добавки к материалу слоя: это могут быть как природные материалы (например, доломит или известняк [17, 18], гематит [19]), так и синтезированные каталитические системы (обычно нанесенные соли никеля и железа [20, 21]). Однако при газификации в кипящем слое наличие ожиженного инертного материала является одним из необходимых условий работы аппарата. Материал слоя позволяет сохранять термическую однородность и устойчивость слоя. При газификации в плотном слое добавление инертного материала снижает удельную теплотворную способность (в расчете на единицу массы смеси), поэтому в общем случае термическая устойчивость процесса ухудшается. С другой стороны, инертный материал выступает в роли жесткого каркаса слоя, обеспечивая необходимую проницаемость и не позволяя ему оседать. В процессах фильтрационного горения инертный материал – это аккумулятор теплоты, позволяющий подогреть дутье перед реакционной зоной [22]. Наконец, каталитическая активность материала способствует конверсии продуктов пиролиза и повышает теплотворную способность генераторного газа [23].

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуется процесс обращенной газификации древесной биомассы с добавлением инертного и активного (способствующего разложению смол) материалов.

Математическая модель обращенного процесса газификации древесины

Рассматривается стационарный процесс газификации древесной биомассы в

плотном слое. Свойства древесины приведены в табл. 1. Активный материал смешивается с топливом до поступления в реактор. Начальный размер частиц древесины и негорючего материала равен 1 см. Уравнения, описывающие стационарный теплообмен в слое, могут быть записаны следующим образом [24–26]:

$$\lambda_f \frac{d^2 T^f}{dz^2} - (C_p^f J^f + C_p^s J^s) \frac{dT^f}{dz} + \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) + Q^f(z) = 0,$$

$$\lambda^g \frac{d^2 T^g}{dz^2} - C_p^g J^g \frac{dT^g}{dz} - \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) - \alpha_2 S_2 (T^g - T^w) + Q^g(z) = 0.$$

Здесь T – температура, К; C_p – теплоемкость, Дж/кг/К; λ – эффективная теплопроводность, Вт/м/К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²/К; J – массовый поток, кг/с; S_1 – площадь теплообмена между газом и топливом, м²; S_2 – площадь теплообмена между газом и стенкой, м²; Q – источник теплоты, Вт; z – пространственная координата (высота слоя), м; индексы f , s , g и w соответствуют топливу, инертному материалу газу и стенке. Теплоемкость потока твердой фазы равна сумме теплоемкостей топлива и инертного материала, температура частиц топлива и частиц материала слоя считаются равными. Коэффициенты переноса рассчитываются по средневзвешенным теплофизическим параметрам смеси. Инертный материал по своим свойствам эквивалентен зольному остатку.

Таблица 1

Свойства древесного топлива (% масс.)

W^f , %	10
A^d , %	0,45
V^{daf} , %	84,5
C^{daf} , %	49,1
H^{daf} , %	6,2
O^{daf} , %	44,65
N^{daf} , %	0,05

Эти уравнения вместе с соответствующими граничными условиями (постоянные расходы газа и топлива на входе в слой) определяют распределение температуры в реакторе. Для их решения необходимо знать также функции источников теплоты $Q(z)$. Эти функции определяются кинетикой химических реакций. В настоящей работе применяется упрощенный кинетико-термодинамический подход для их расчета: учитывается кинетика гетерофазных реакций, а реакции в газовой фазе считаются равновесными [25].

При численном решении задачи реактор разбивается по оси на ряд элементов малого объема. Зная время пребывания газа в каждом из этих элементов, можно записать для выбранного i -го элемента функцию источника теплоты:

$$Q_i(z) = \frac{-\Delta H_i^r}{\tau_i} = \frac{\left(\sum h_j n_j^{in} - \sum h_j n_j^{out} \right)}{\tau_i}.$$

Здесь ΔH^r – изменение энтальпии в результате химических реакций, Дж; h_j – мольная энтальпия j -го компонент, Дж/моль; n_j – количество j -го компонента, моль; τ – время контакта, с; индекс in относится к входящему потоку, out – к выходящему.

Таким образом, для вычисления функции источника (или стока) теплоты необходимо знать изменение компонентного состава системы в малом объеме. Расчет изменения химического состава происходит в две стадии. Сначала рассматриваются гетерогенные процессы: сушка, пиролиз и реакции углеродистого остатка с O_2 , CO_2 и H_2O :

$$\frac{dn_{H_2O}}{dt} = \beta S_1 \left(C_{H_2O}^{eq} - \frac{n_{H_2O}}{V_g} \right),$$

$$\frac{dn_V}{dt} = -k_{pyr} n_V,$$

$$\frac{dn_C}{dt} = -k_{O_2}^{eff} S_1 \frac{n_{O_2}}{V_g} - k_{CO_2}^{eff} S_1 \frac{n_{CO_2}}{V_g} - k_{H_2O}^{eff} S_1 \frac{n_{H_2O}}{V_g}.$$

Здесь V_g – порозный объем, м³; β – коэффициент массообмена, м/с; C^{eq} – равновесная концентрация паров воды, моль/м³; k_{pyr} – константа скорости пиролиза, с⁻¹; n_V – количество летучих веществ в топливе, моль; n_C – количество углерода топлива, моль; n_{O_2} , n_{CO_2} , n_{H_2O} , – количество молей соответствующих веществ в порозном объеме, моль; S_1 – площадь реакционной поверхности топлива, м²; k_{eff} – эффективная константа скорости гетерогенной реакции, м/с (нижний индекс относится к газифицирующему агенту). Эффективная константа скорости гетерогенной реакции k_{eff} определяется в квазистационарном приближении:

$$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)}}.$$

Здесь k_0 – предэкспонент, м/с; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль/К. Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций

Реакция	Предэкспонент	Энергия активации
Пиролиз древесины	$5,4 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$	96 кДж/моль
$C + O_2$	$2,4 \times 10^5 \text{ м/с}$	142
$C + CO_2$	$1,32 \times 10^6 \text{ м/с}$	259
$C + H_2O$	$9,3 \times 10^5$	175
Термическое разложение смолы	10^5 с^{-1}	150
Каталитическое разложение смолы	$0 \div 10^5 \text{ м/с}$	90

Предполагается, что частицы активного компонента равномерно распределены в слое топлива. Разложение смолистых продуктов протекает на поверхности этих частиц, поэтому скорость разложения пропорциональна концентрации смолы в газе, площади поверхности и эффективному кинетическому коэффициенту с аррениусовской зависимостью от температуры:

$$\frac{dn_T}{dt} = -k_T^a \frac{n_T}{V_g} - k_T^b S_c \frac{n_T}{V_g}.$$

Здесь n_T – количество смол, моль; S_c – площадь поверхности активного материала, м². Первое слагаемое соответствует некаталитическому (термическому) разложению смолы, второе – разложению смол при контакте с поверхностью активного материала.

В расчетах принят кинетический коэффициент в аррениусовской форме, где эффективная энергия активации E равна 90 кДж/моль, а предэкспонент k_A [м³/(м² с)]=м/с] выступает в роли варьируемого параметра. Поскольку этот параметр определяется состоянием поверхности, пористой структурой и химической природой материала, его величина может существенно меняться в зависимости от условий процесса. Физический

смысл этого коэффициента – условная активность материала слоя, и в расчетах его величина варьируется. В качестве материала поверхности могут быть использованы синтетические каталитические системы (с высокой активностью, но требующие высоких затрат на получение и выделение из продуктов газификации, такие как соединения никеля [27, 28], церия [29], циркония [30]) или, что более вероятно, природные минералы (дешевые, но обладающие меньшей активностью; среди них можно выделить доломит [31, 32], оливин [33], кальцит [34]). Предполагается, что материал слоя влияет только на кинетику разложения смолы и не влияет на процессы пиролиза и газификации топлива.

Результаты расчетов

С одной стороны, добавление негорючих материалов в слой уменьшает температуру горения топлива и увеличивает расходы на топливоподготовку и удаление золы. С другой стороны, разложение смол до простых горючих газов повышает калорийность газа и удешевляет систему его очистки перед сжиганием. Поэтому необходимо оценить оптимальную долю активного компонента. Эта доля будет зависеть от множества факторов, среди которых в первую очередь можно выделить активность гетерогенного разложения смолы. На рисунке показаны результаты расчетов для смесей древесины и активных компонентов с разным соотношением расходов и разной каталитической активностью.

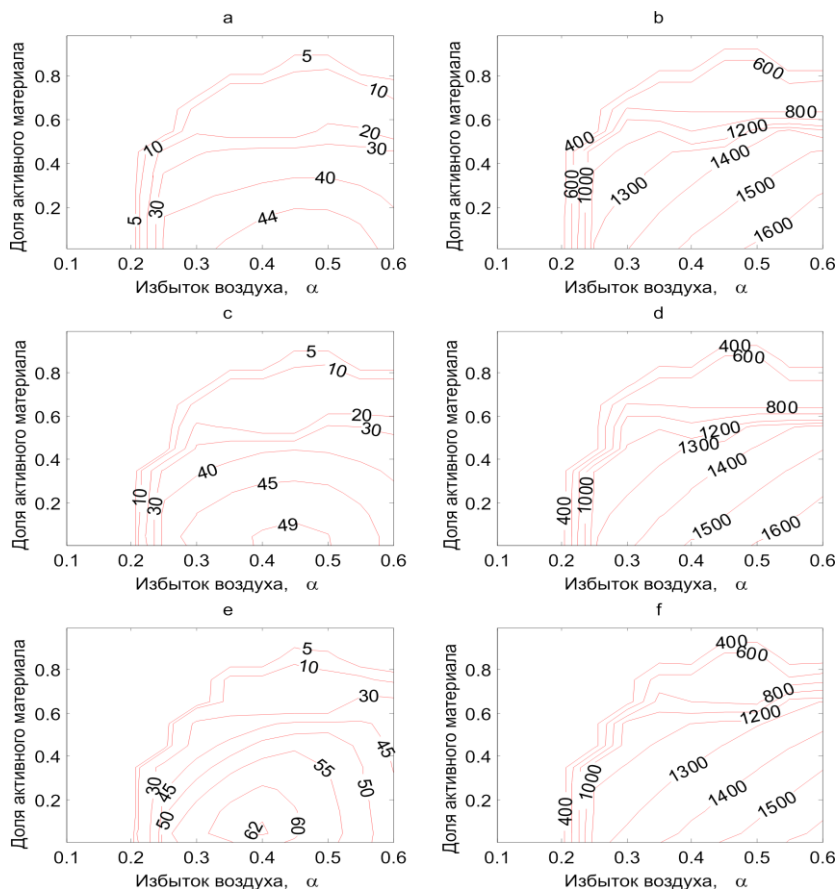


Рис. Зависимость химического КПД процесса газификации (%) и максимальной температуры процесса газификации (в градусах Кельвина) от коэффициента избытка воздуха (ось абсцисс) и доли негорючего компонента (ось ординат). Условная активность гетерогенного разложения смолы: $a, b - 0$ (инертный материал); $c, d - 10^4$; $e, f - 10^5$

Химический КПД процесса газификации определяется как отношение теплотворной способности газа к теплотворной способности твердого топлива, из которого он был получен [35]. Для инертного материала с нулевой активностью (рис., *a*) эффективность ожидаемо уменьшается с ростом доли негорючего компонента. При доле негорючего компонента около 30–40% процесс газификации практически затухает, протекая в режиме с очень низкой интенсивностью и с низким химическим КПД. Повышение активности негорючего компонента приводит к росту эффективности и смещению оптимальной точки в сторону увеличения массовой доли активного материала (рис., *c* и *e*). Так, при условной активности негорючего материала, равной 10^5 , удается достичь химического КПД, равного 62%, при доле инертного материала порядка 5–10%.

Расчеты показывают, что при увеличении активности материала слоя границы термической устойчивости сдвигаются незначительно: скорость разложения смолы все так же чувствительна к температуре слоя.

В достаточно широком диапазоне активностей негорючий материал практически не сказывается на эффективности процесса: для получения значимого эффекта необходима условная активность порядка 10^4 , ниже этого значения влияние добавок негорючего материала сводится к снижению удельной теплотворной способности смеси и мало отличается от добавок материала с нулевой активностью.

Добавление активного материала ставит вопрос об его извлечении: оно может происходить путем выдувания или отсеивания зольного остатка. Для этого, однако, необходимо поддерживать оптимальный температурный уровень в ядре горения: при превышении температуры плавления золы слой может агломерироваться, что создает дополнительные проблемы при эксплуатации. Поэтому область эффективных режимов будет ограничиваться необходимостью соблюдения подходящих температурных условий. Как видно из рисунка, при коэффициенте избытка окислителя более 0,3–0,4 температура слоя может превышать характерные температуры деформации и плавления золы [36]. Поэтому в некоторых случаях возможно увеличение доли негорючего материала в слое для снижения опасности спекания при шлаковании.

Выводы

В работе проведено расчетное исследование эффективности разложения смолы при газификации древесины путем добавления в слой каталитически активного негорючего материала. Результаты математического моделирования показывают существование максимума химического КПД газификации при доле активного материала около 5–10% масс. Для этого, однако, необходима достаточно высокая каталитическая активность материала. Возможные проблемы извлечения активного материала из коксозольного остатка газификации могут возникать, в том числе, из-за превышения в процессе газификации температуры плавления золы, поэтому выбор термического режима требует коррекции с учетом свойств минеральной части конкретного топлива.

Литература

1. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review / S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 72. P. 363–384. (DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.038).
2. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production / L. Wang, C.L. Weller, D.D. Jones, M.A. Hanna // *Biomass and Bioenergy*. 2008. V. 32. P. 573–581. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.12.007).
3. Development of an ultra–small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot–scale updraft fixed bed gasifier / L. Ding, K. Yoshikawa, M. Fukuhara, Y. Kowata, S. Nakamura, D. Xin, L. Muhan // *Fuel*. 2018. V. 220. P. 210–219. (DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.080).
4. 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, S.Y. Giraldo, R.L. Jaen, V.M. Cobas // *Biomass and Bioenergy*. 2014. V. 61. P. 236–244. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.12.017).

5. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. V. 46. P. 72–95. (DOI: 10.1016/j.peccs.2014.06.002).

6. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).

7. Mun T.-Y., Seon P.-G., Kim J.-S. Production of a producer gas from woody waste via air gasification using activated carbon and a two-stage gasifier and characterization of tar // *Fuel*. 2010. V. 89. P. 3226–3234. (DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.042).

8. Zhang Y., Zheng Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations // *Fuel*. 2016. V. 183. P. 132–138. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.066).

9. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents / C.A.V.B. de Sales, D.M.Y. Maya, E.E.S. Lora, R.L. Jaen, A.M.M. Reyes, A.M. Gonzalez, R.V. Andrade // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 145. P. 314–323. (DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.101).

10. A review of biomass gasification syngas cleanup / N. Abdoulmoumine, S. Adhikari, A. Kulkarni, S. Chattanathan // *Applied Energy*. 2015. V.155. P. 294–307. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.095).

11. Woolcock P.J., Brown R.C. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas // *Biomass and Bioenergy*. 2013. V. 52. P. 54–84. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.02.036).

12. Reforming solutions for biomass-derived gasification gas – Experimental results and concept assessment / N. Kaisalo, J. Kihlman, I. Hannula, P. Simell // *Fuel*. 2015. V. 147. P. 208–220. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.056).

13. Zhang R., Brown R.C., Suby A. Thermochemical Generation of Hydrogen from Switchgrass // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. No. 1. P. 251–256. (DOI: 10.1021/ef034024d).

14. Ran J., Li C. High temperature gasification of woody biomass using regenerative gasifier // *Fuel Processing Technology*. 2012. V. 99. P. 90–96. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.01.002).

15. Materazzi M. Clean energy from waste. Fundamental investigations on ashes and tar behaviour in a two-stage fluid bed-plasma process for waste gasification. Doctoral Thesis accepted by University College London, UK (Springer Theses). Springer, 2017. 254 p. (DOI: 10.1007/978-3-319-46870-9)

16. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).

17. Corella J., Toledo J.M., Padilla R. Olivine or Dolomite as In-Bed Additive in Biomass Gasification with Air in a Fluidized Bed: Which Is Better? // *Energy & Fuels*. 2004. V. 18 (3). P. 713–720. (DOI: 10.1021/ef0340918).

18. Effect of pressure on tar decomposition activity of different bed materials in biomass gasification conditions / S. Tuomi, N. Kaisalo, P. Simell, E. Kurkela // *Fuel*. 2015. V. 158. P. 293–305. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.051).

19. Catalytic gasification of woody biomass in an air-blown fluidized-bed reactor using Canadian limonite iron ore as the bed material / S. Hurley, C. Xu, F. Preto, Y. Shao, H. Li, J. Wang, G. Tourigny // *Fuel*. 2012. V. 91. P. 170–176. (DOI: 10.1016/j.fuel.2011.07.016).

20. Biomass gasification in a catalytic fluidized reactor with beds of different materials / F. Miccio, B. Piriou, G. Ruoppolo, R. Chirone // *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 154. P. 369–374. (DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.002).

21. H₂-rich syngas production by fluidized bed gasification of biomass and plastic fuel / G. Ruoppolo, P. Ammendola, R. Chirone, F. Miccio // *Waste Management*. 2012. V. 32. No. 4. P. 724–732. (DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.004).

22. Specific Features of Filtration Combustion of a Pyrolyzed Solid Fuel / E.A. Salganskii, V.M. Kislov, S.V. Glazov, A.F. Zholudev, G.B. Manelis // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. V.

46. No. 5. P. 528–532. (DOI: 10.1007/s10573–010–0069–6).

23. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance / S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, X. Guo, M. He // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. P. 2191–2194. (DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.075).

24. Донской И.Г. Влияние смолообразования на эффективность процесса воздушной газификации биомассы // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2015. № 5–6. С. 93–100.

25. Coal gasification process simulations using combined kinetic–thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. No. 3. P. 529–559. (DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505).

26. Донской И.Г. Моделирование процесса совместной газификации древесины и полимерных материалов в плотном слое // *Химия твердого топлива*. 2018. № 2. С. 67–72.

27. Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal / M.-H. Cho, T.-Y. Mun, Y.-K. Choi, J.-S. Kim // *Energy*. 2014. V. 70. P. 128–134. (DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.097).

28. Steam reforming of phenol as biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalyst / M. Artetxe, M.A. Nahil, M. Olazar, P.T. Williams // *Fuel*. 2016. V. 184. P. 629–636. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.036).

29. Steam gasification of safflower seed cake and catalytic tar decomposition over ceria modified iron oxide catalysts / G. Duman, T. Watanabe, M.A. Uddin, J. Yanik // *Fuel Processing Technology*. 2014. V. 126. P. 276–283. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.04.035).

30. Acidic and basic surface sites of zirconia-based biomass gasification gas clean-up catalysts / T. Viinikainen, H. Ronkkonen, H. Bradshaw, H. Stephenson, S. Airaksinen, M. Reinkainen, P. Simell, O. Krause // *Applied Catalysis A: General*. 2009. V. 362. P. 169–177. (DOI: 10.1016/j.apcata.2009.04.037).

31. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).

32. Study on the combustion kinetic characteristics of biomass tar under catalysts / C. Li, Y. Yamamoto, M. Suzuki, D. Hirabayashi, K. Suzuki // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009. V. 95. No. 3. P. 991–997. (DOI: 10.1007/s10973-008-9126-8).

33. Olivine catalysts for methane- and tar-steam reforming / J.N. Kuhn, Z. Zhao, L.G. Felix, R.B. Slimane, C.W. Choi, U.S. Ozkan // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. V. 81. P. 14–26. (DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.11.040).

34. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).

35. Grabner M. *Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal*. – Wiley–VCH, 2015. 376 p.

36. Fang X., Jia L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass // *Bioresource Technology*. 2012. V. 104. P. 769–774. (DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.055).

Авторы публикации

Игорь Геннадьевич Донской – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории термодинамики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Иркутск, Россия. Email: donskey.chem@mail.ru.

References

1. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review / S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 72. P. 363–384. (DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.038).

2. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production / L. Wang, C.L. Weller, D.D. Jones, M.A. Hanna // *Biomass and Bioenergy*. 2008. V. 32. P. 573–581. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.12.007).
3. Development of an ultra–small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot–scale updraft fixed bed gasifier / L. Ding, K. Yoshikawa, M. Fukuhara, Y. Kowata, S. Nakamura, D. Xin, L. Muhan // *Fuel*. 2018. V. 220. P. 210–219. (DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.080).
4. 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, S.Y. Giraldo, R.L. Jaen, V.M. Cobas // *Biomass and Bioenergy*. 2014. V. 61. P. 236–244. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.12.017).
5. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. V. 46. P. 72–95. (DOI: 10.1016/j.peccs.2014.06.002).
6. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).
7. Mun T.-Y., Seon P.-G., Kim J.-S. Production of a producer gas from woody waste via air gasification using activated carbon and a two–stage gasifier and characterization of tar // *Fuel*. 2010. V. 89. P. 3226–3234. (DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.042).
8. Zhang Y., Zheng Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations // *Fuel*. 2016. V. 183. P. 132–138. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.066).
9. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two–stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents / C.A.V.B. de Sales, D.M.Y. Maya, E.E.S. Lora, R.L. Jaen, A.M.M. Reyes, A.M. Gonzalez, R.V. Andrade // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 145. P. 314–323. (DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.101).
10. A review of biomass gasification syngas cleanup / N. Abdoulmoumine, S. Adhikari, A. Kulkarni, S. Chattanathan // *Applied Energy*. 2015. V.155. P. 294–307. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.095).
11. Woolcock P.J., Brown R.C. A review of cleaning technologies for biomass–derived syngas // *Biomass and Bioenergy*. 2013. V. 52. P. 54–84. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.02.036).
12. Reforming solutions for biomass-derived gasification gas – Experimental results and concept assessment / N. Kaisalo, J. Kihlman, I. Hannula, P. Simell // *Fuel*. 2015. V. 147. P. 208–220. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.056).
13. Zhang R., Brown R.C., Suby A. Thermochemical Generation of Hydrogen from Switchgrass // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. No. 1. P. 251–256. (DOI: 10.1021/ef034024d).
14. Ran J., Li C. High temperature gasification of woody biomass using regenerative gasifier // *Fuel Processing Technology*. 2012. V. 99. P. 90–96. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.01.002).
15. Materazzi M. Clean energy from waste. Fundamental investigations on ashes and tar behaviour in a two–stage fluid bed–plasma process for waste gasification. Doctoral Thesis accepted by University College London, UK (Springer Theses). Springer, 2017. 254 p. (DOI: 10.1007/978–3–319–46870–9)
16. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).
17. Corella J., Toledo J.M., Padilla R. Olivine or Dolomite as In–Bed Additive in Biomass Gasification with Air in a Fluidized Bed: Which Is Better? // *Energy & Fuels*. 2004. V. 18 (3). P. 713–720. (DOI: 10.1021/ef0340918).
18. Effect of pressure on tar decomposition activity of different bed materials in biomass gasification conditions / S. Tuomi, N. Kaisalo, P. Simell, E. Kurkela // *Fuel*. 2015. V. 158. P. 293–305. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.051).
19. Catalytic gasification of woody biomass in an air–blown fluidized–bed reactor using Canadian limonite iron ore as the bed material / S. Hurley, C. Xu, F. Preto, Y. Shao, H. Li, J. Wang, G. Tourigny // *Fuel*. 2012. V. 91. P. 170–176. (DOI: 10.1016/j.fuel.2011.07.016).

20. Biomass gasification in a catalytic fluidized reactor with beds of different materials / F. Miccio, B. Piriou, G. Ruoppolo, R. Chirone // *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 154. P. 369–374. (DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.002).
21. H₂-rich syngas production by fluidized bed gasification of biomass and plastic fuel / G. Ruoppolo, P. Ammendola, R. Chirone, F. Miccio // *Waste Management*. 2012. V. 32. No. 4. P. 724–732. (DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.004).
22. Specific Features of Filtration Combustion of a Pyrolyzed Solid Fuel / E.A. Salganskii, V.M. Kislov, S.V. Glazov, A.F. Zholudev, G.B. Manelis // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. V. 46. No. 5. P. 528–532. (DOI: 10.1007/s10573-010-0069-6).
23. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance / S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, X. Guo, M. He // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. P. 2191–2194. (DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.075).
24. Donskoy I.G. Tar formation influence on fixed bed air-blown biomass gasification process efficiency // *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems.* – 2015. – No. 5–6. – P. 93–100. [in Russian].
25. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. No. 3. P. 529–559. (DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505).
26. Donskoi I.G. Process simulation of the co-gasification of wood and polymeric materials in a fixed bed // *Solid Fuel Chemistry*. – 2018. – V. 52. – No. 2. – P. 121–127. (DOI: 10.3103/S0361521918020027)
27. Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal / M.-H. Cho, T.-Y. Mun, Y.-K. Choi, J.-S. Kim // *Energy*. 2014. V. 70. P. 128–134. (DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.097).
28. Steam reforming of phenol as biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalyst / M. Artetxe, M.A. Nahil, M. Olazar, P.T. Williams // *Fuel*. 2016. V. 184. P. 629–636. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.036).
29. Steam gasification of safflower seed cake and catalytic tar decomposition over ceria modified iron oxide catalysts / G. Duman, T. Watanabe, M.A. Uddin, J. Yanik // *Fuel Processing Technology*. 2014. V. 126. P. 276–283. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.04.035).
30. Acidic and basic surface sites of zirconia-based biomass gasification gas clean-up catalysts / T. Viinikainen, H. Ronkkonen, H. Bradshaw, H. Stephenson, S. Airaksinen, M. Reinkainen, P. Simell, O. Krause // *Applied Catalysis A: General*. 2009. V. 362. P. 169–177. (DOI: 10.1016/j.apcata.2009.04.037).
31. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).
32. Study on the combustion kinetic characteristics of biomass tar under catalysts / C. Li, Y. Yamamoto, M. Suzuki, D. Hirabayashi, K. Suzuki // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009. V. 95. No. 3. P. 991–997. (DOI: 10.1007/s10973-008-9126-8).
33. Olivine catalysts for methane- and tar-steam reforming / J.N. Kuhn, Z. Zhao, L.G. Felix, R.B. Slimane, C.W. Choi, U.S. Ozkan // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. V. 81. P. 14–26. (DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.11.040).
34. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).
35. Grabner M. *Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal.* – Wiley-VCH, 2015. 376 p.
36. Fang X., Jia L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass // *Bioresource Technology*. 2012. V. 104. P. 769–774. (DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.055).

© *И.Г.Донской*

Authors of the publication

Igor G. Donskoy – PhD in Engineering sciences, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia. Email: donskoy.chem@mail.ru.

Поступила в редакцию

07 декабря 2018 г.