



DOI: 10.18721/JEST.230303

УДК 620.92

Г.В. Кузнецов, С.А. Янковский

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ ИЗ УГЛЯ И ДРЕВЕСИНЫ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов термического разложения композитных топлив на основе длиннопламенного угля (месторождение «Листвяжное») и отходов лесопромышленного производства (ООО Дзержинский ЛПК, г. Томск). Определены основные характеристики композитных топлив: теплота сгорания; влажность; зольность; выход летучих; зависимости степени термического разложения от температуры; установлены масштабы снижения выделяемых антропогенных газов при увеличении концентрации древесины в композитном топливе. Установлен эффективный состав композитного топлива: 50 % / 50 %. При такой концентрации энергетические характеристики снижаются менее чем на 9 %, но при этом выход летучей золы уменьшается на 34 %, а выход оксидов SO_x, NO_x до 30 %. Выполненные исследования позволяют обосновать возможность использования данных композитных топлив для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов.

КОМПОЗИТНОЕ ТОПЛИВО; ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ; УГОЛЬ; ДРЕВЕСИНА; КИНЕТИКА.

Ссылка при цитировании:

Г.В. Кузнецов, С.А. Янковский. Эффективность применения композитных топлив из угля и древесины в промышленной энергетике // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 29–36. DOI: 10.18721/JEST.230303

G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russian Federation

EFFICIENCY OF USING COMPOSITE FUELS MADE OF COAL AND WOOD IN INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

The results of experimental studies of the thermal decomposition processes of composite fuels based on long-flame coal (the Listvyazhnoe deposit) and based on timber industry wastes (Dzerzhinsky LPK, Tomsk) are presented. The main characteristics of composite fuels are determined: heat of combustion; humidity; ash content; release of volatiles; influence of thermal decomposition degree on temperature; the scale of the decrease in the emissions of anthropogenic gases with an increase of wood concentration in composite fuel is established. An effective composite fuel composition has been established as 50 %/50 %. At this concentration, energy characteristics decrease by less than 9 %, but yield of fly ash and SO_x, NO_x oxides is reduced by 34 % and 30 %, respectively. The conducted experimental research allows justifying the possibility of using these composite fuels for combustion in steam and hot-water boilers.

COMPOSITE FUEL; THERMAL DECOMPOSITION; COAL; WOOD; KINETICS.

Citation:

G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky, Efficiency of using composite fuels made of coal and wood in industrial power engineering, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) 29–36, DOI: 10.18721/JEST.230303

Введение

По прогнозам [1, 2], среднегодовой рост потребления электроэнергии, вызванный увеличением численности населения и развитием производственных мощностей, до 2030 года составит 2,4 %. Уголь — широко распространенный мировой ископаемый энергетический ресурс, доступный по стабильной цене от многих российских и международных поставщиков. В настоящее время 36 % электроэнергии в мире вырабатывается с использованием угля [2].

Снижение темпа его использования связано в основном с применением устаревших технологий производства тепла и электроэнергии, а также интенсивным выделением загрязняющих веществ (CO_2 , SO_x , NO_x , летучая зола и другие) [2–4].

Существенной проблемой при применении угля является его дорогостоящая транспортировка. Затраты на поставку в отдаленные районы РФ приводят к росту цен на энергоносители для потребителей [5]. Одним из решений данной проблемы в энергетике может стать создание композитных топлив на основе угля и биомассы. Китай, Индия, США, Канада, Россия и многие другие страны активно ведут исследования по использованию в энергетике различных видов композитных топлив: водоугольных [6, 7], органоугольных [8, 9], на основе отходов лесопромышленного производства [10, 11] и др.

Добавление к углю мелкодисперсной древесины в качестве компоненты при формировании композитного топлива для производства тепла и электроэнергии имеет то преимущество, что смесь «биомасса — углерод» — нейтральна. Древесина и ее отходы — наиболее распространенный биоресурс [11]. Приготовление композитных топлив может позволить снизить объемы потребления привозного угля за счет использования местных энергоресурсов [12]. Однако применение таких топлив пока не развито в значительной мере из-за того, что отсутствует общая теория как формирования их компонентного состава, так и сжигания. Экспериментально недостаточно изучены экологические, энергетические, технические характеристики получаемых композитных топлив, в том числе с добавлением древесины в уголь. Результаты, представленные в [13–15], не могут быть основой анализа закономерно-

стей процессов термического разложения композитных топлив при изменении соотношения концентрации древесины и угля. Поэтому исследование в данном направлении актуально. Анализ возможности создания композитных топлив с энергетическими характеристиками, близкими к однородному углю, и существенно лучшими экологическими параметрами представляет высокий интерес.

Цель исследования — экспериментальная оценка энергетических и экологических характеристик композитного топлива на основе угля и отходов лесопромышленного производства (древесины).

Методика экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях использовались уголь месторождения «Листвяжное» (частицы размером менее 80 мкм) и отходы производства пиломатериалов ООО Дзержинский ЛПК, г. Томск (размер частиц менее 200 мкм).

Подготовка навесок композитных топлив проводилась при разных массовых концентрациях (табл. 1). Смесь частиц угля и древесины помещалась в оцинкованный барабан планетарной мельницы Pulverisette 6 с шарообразными мелющими телами диаметром 5 мм в массовом соотношении 1:1. Процесс смешения осуществлялся при скорости вращения 500 об/мин в течение семи минут [16].

Исследования структуры и фракционного состава композитных топлив проведены методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с использованием сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) JSM 6000С (JEOL, Япония) [16]. Прибор позволяет исследовать структуру поверхности композитного топлива с увеличением от 10 до 60 000 крат.

Цель экспериментальных исследований — определение калорийности, зольности, влажности и выхода летучих исследовавшихся композитных топлив.

На установке Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany) выполнен термический анализ каждой навески массой 20 мг при скорости роста температуры 10 °С/мин (максимальная достигнутая температура 1100 °С) [15].

Для определения степени реактивности композитных топлив использована методика [17]. Температура воспламенения определялась

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Table 1

Results of experimental research

Вещество	Теплота сгорания Q , МДж/кг	Влага W , %	Зольность A , %	Выход летучих V_{daf} , %
Древесина	21,73	6,96	0,29	80,25
Каменный уголь Д	26,20	5,83	15,76	12,36
10 % — древесина, 90 % — Д	24,92	5,42	14,00	14,55
25 % — древесина, 75 % — Д	24,31	5,23	11,91	38,89
50 % — древесина, 50 % — Д	23,84	5,35	10,44	40,96
75 % — древесина, 25 % — Д	22,85	5,72	6,93	60,37
90 % — древесина, 10 % — Д	21,75	5,83	3,29	75,16

методом, изложенным в [17, 18]. Индекс загорания D_i рассчитывался по формуле [17]

$$D_i = \frac{(d_v / d_t)_{\max}}{t_p t_e} \quad (1)$$

Здесь $(dw/dt)_{\max}$ — максимальная скорость термического разложения; t_p — время достижения максимальной скорости термического разложения; t_e — время начала термического разложения.

Индекс D_f используется для оценки степени полного термического разложения, которая описывается формулой [18–19]

$$D_f = \frac{(d_w / d_t)_{\max}}{\Delta t_{1/2} t_p t_f} \quad (2)$$

где $\Delta t_{1/2}$ — полупериод, определяемый в момент достижения максимальной скорости термического разложения; t_f — время полного термического разложения топлива.

Анализ продуктов термического разложения композитных топлив проводили квадрупольным прибором (масс-спектрометр QMS 403 С Aeolos).

Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 1 представлен снимок поверхности навески топлива (увеличение 500 крат).

Из рис. 1 видно, что на фотографии композитного топлива можно выделить включения продолговатых крупных частиц (древесина) и более мелких (уголь).

Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 результаты позволяют сделать вывод, что увеличение концентрации мелкодисперсной древесины от 10 до 50 % приводит к снижению теплотворной способности композитных топлив менее чем на 9 % по сравнению с однородным углем. Даже при увеличении концентрации древесины до 90 % калорийность топлива снижается менее чем на 17 %.

Видно, что увеличение концентрации древесины до 50 % незначительно влияет на

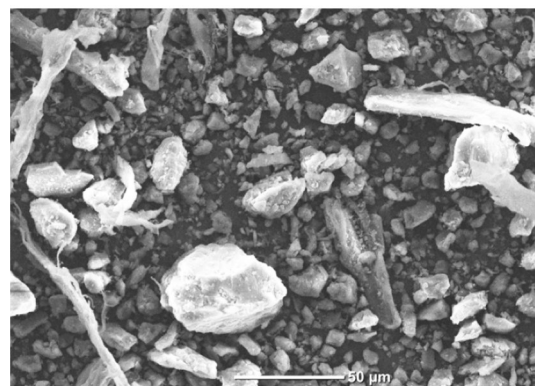


Рис. 1. Фотография поверхности навески, выполненная микроскопом

Fig. 1. A photograph of the sample surface made with a microscope

энергетические характеристики композитных топлив по отношению к однородному углю, но экологические показатели улучшаются: зольность снижается до 34 %, выход летучих веществ увеличивается до 30 %.

Увеличение компоненты древесины в топливе до 90 % приводит к снижению зольности

до 79 %, при этом выход летучих веществ составляет 70 %.

Результаты исследования термического разложения навесок композитных топлив, выполненные методами совмещенной термогравиметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии, представлены на рис. 2.

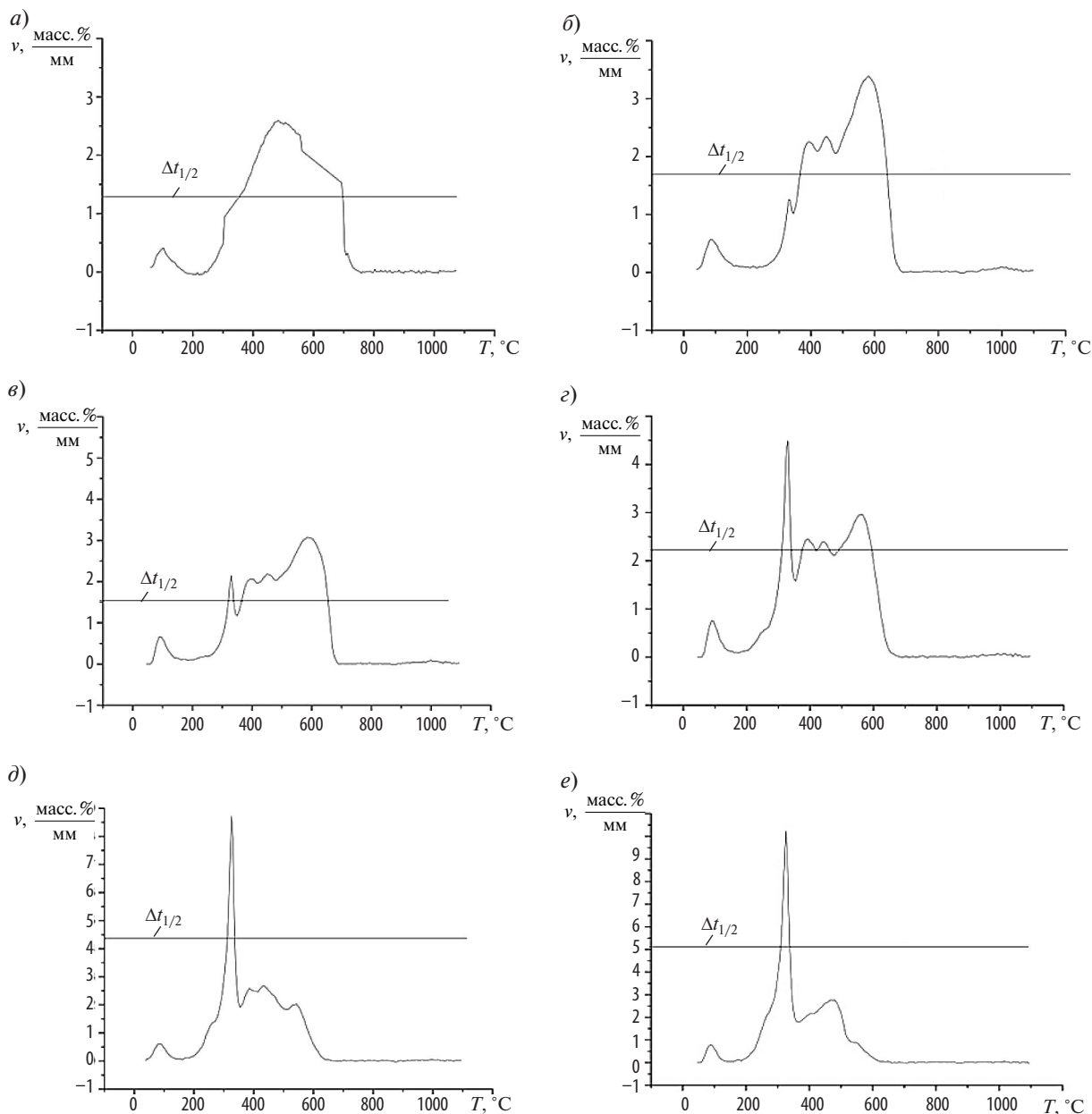


Рис. 2. Скорости термического разложения композитных топлив в зависимости от температуры при разном процентном соотношении древесины к углю: а — 0; б — 10/90; в — 25/75; г — 50/50; д — 75/25 е — 90/10

Fig. 2. Dependence of composite fuels thermal decomposition rates from temperature. Wood to coal ratio: а — 0; б — 10/90; в — 25/75; г — 50/50; д — 75/25 е — 90/10

Таблица 2

Характеристики термического разложения композитных топлив

Table 2

Characteristics of thermal decomposition of composite suels

Вариант композитного топлива (см. рис. 2)	Древесина : уголь Д, % : %	$V_{max},$ °С/мин	$t_p,$ °С	$t_e,$ °С	$t_r,$ °С	$\Delta t_{1/2},$ °С	$\frac{D_i, \text{масс.}\%}{T^2}$	$\frac{D_i, \text{масс.}\%}{T^2}$
<i>a</i>	0:100	2,58	481,52	220,10	753,26	343,48	$2,43 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-8}$
<i>б</i>	10:90	3,39	579,89	229,34	689,13	273,91	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$3,09 \cdot 10^{-7}$
<i>в</i>	25:75	3,07	585,30	184,00	691,30	334,20	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-8}$
<i>г</i>	50:50	4,49	330,43	174,45	690,76	283,70	$7,79 \cdot 10^{-5}$	$6,93 \cdot 10^{-8}$
<i>д</i>	75:25	8,72	325,50	159,78	691,85	112,0	$16,8 \cdot 10^{-5}$	$34,6 \cdot 10^{-8}$
<i>e</i>	90:10	10,24	325,50	159,24	660,33	71,19	$19,8 \cdot 10^{-5}$	$66,9 \cdot 10^{-8}$

В табл. 2 приведены данные, соответствующие тем же вариантам *a–e* композитных топлив, что и на рис. 2.

На рис. 2 видно, что увеличение концентрации древесины в композитном топливе до 50 % приводит к снижению температуры максимума термического разложения до 31 %, а времени тепловыделения — менее чем на 5,6 %. Такое снижение обусловлено высокой реакционной способностью древесины при низких температурах. Термическое разложение древесины происходит на первой стадии, угля — на второй.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при увеличении концентрации древесины в композитном топливе происходит снижение температуры начала термического разложения топлива, увеличивается его реакционная способность и период времени пиролиза до завершения процесса образования зольного остатка. Экспериментальные данные позволяют сделать заключение, что эффективный концентрационный состав композитного топлива — это 50 % : 50 %.

Результаты исследований состава продуктов пиролиза композитных топлив (с целью сравнения негативного воздействия на окружающую среду) представлены на рис. 3. Они позволяют оценить, как увеличение доли древесины в композитном топливе влияет на снижение концентрации антропогенных газов по отношению к 100 % газов, выделяемых при термическом разложении однородного угля.

Установлено (см. рис. 2) снижение доли оксидов азота до 50 %, диоксида углерода до 70 %,

диоксида серы на 83 %. При соотношении компонент 50 % : 50 % снижение NO составляет до 30 %, CO₂ — до 22 %, SO₂ — до 37 %. Изложенное подтверждает синергетический эффект данной концентрации композитного топлива.

Заключение

Выявлено, что концентрационный состав 50 % : 50 % обеспечивает кинетические и энергетические характеристики композитного

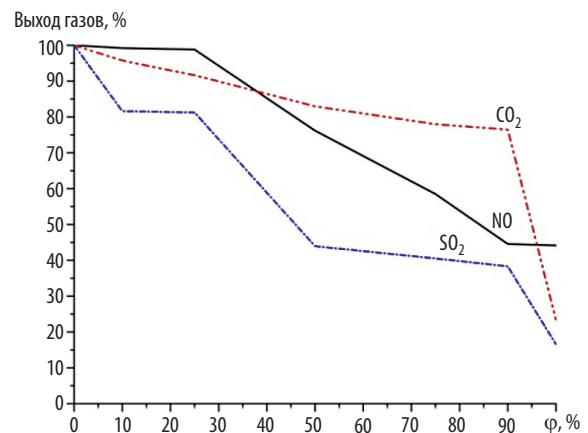


Рис. 3. Концентрации основных выделяемых антропогенных газов при термическом разложении композитных топлив по отношению к чистому углю (φ — доля древесины)

Fig. 3. Concentrations of main anthropogenic gases released during thermal decomposition of composite fuels with respect to pure coal (φ — proportion of wood)

топлива, схожие с характеристиками исходного однородного угля. Доля антропогенных газов, выделяемых при термическом разложении такого топлива, снижается до 33 %.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о перспективности использования композиционных топлив на основе угля и древесины для сжигания в топках котельных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alessandro Franco, Ana R. Diaz.** The future challenges for «clean coal technologies»: Joining efficiency increase and pollutant emission control / Dipartimento d'Energetica «L. Poggi» Università di Pisa. 2008. Vol. 34. Issue 3. P. 348–354. Available online: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>
2. **Termuehlen H., Empsperger W.** Clean and efficient coal fired power plants. New York: ASME Press; 2003.
3. International Energy Agency. Key world energy statistics 2007. International Energy Agency (IEA). Paris, France. 2007. See also [/http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf).
4. BP statistical review of world energy / BP, London, UK, June 2008. See also: [/http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622S](http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622S).
5. **Fedyukhin A.V., Maikov I.L., Sinelshchikov V.A.** Comparison of kinetic models of biomass thermal decomposition // Book of Abstracts of International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Nalchik. Russia. 2011. P. 114–115.
6. **Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Salomatov V.V.** The influence of heat transfer conditions on the parameters characterizing the ignition of coal-water fuel particles. Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). Vol. 62. Issue 10, 2015. Article number A002, P. 703–707. DOI: 10.1134/S0040601515100092
7. **Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V.** Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel // Combustion, Explosion and Shock Waves. Vol. 51. Issue 4. 22 July 2015. P. 409–415. DOI:10.1134/S0010508215040024
8. **Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.** Differences in the ignition characteristics of coal–water slurries and composite liquid fuel // Solid Fuel Chem. (2016) 50: 88. DOI:10.3103/S0361521916020117
9. **Vershinina K.Yu. [et al.]** Experimental Study of the Ignition of Single Drops of Coal Suspensions and Coal Particles in the Oxidizer Flow [Electronic resource] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics : Scientific Journal. 2017. Vol. 90. Iss. 1. P. 198–205. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-017-1556-3>
10. **Oladejo Jumoke M., Adegbite Stephen, Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez Ashak M., Wu Tao.** A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass // Applied Energy. Elsevier. 2017. Vol. 188(C). P. 215–225.
11. **Agnieszka Plis, Michalina Kotyczka-Morańska, Marcin Kopczyński, Grzegorz Łabojko.** Furniture wood waste as a potential renewable energy source // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. Vol. 125. Issue 3. P. 1357–1371. DOI: 10.1007/s10973-016-5611-7
12. **Ушаков А.Г., Ушакова Е.С., Ушаков Г.В.** Твердое композиционное топливо на основе отходов угольных предприятий и избыточного активного ила // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2014. № 3(202). С. 70–79. URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/4866.pdf>
13. **David N., John Z.** Cofiring Biomass and Coal for Fossil Fuel Reduction and Other Benefits—Status of North American Facilities in 2010 // Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-867 / Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 22 p. https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr867.pdf (August 2012)
14. **Van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A., Ptasinski K.J.** Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels // Biomass Bioenergy. 2011;35:3748–3762.
15. **Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalo J.P.S.** A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation // Renew Sustain Energy Rev. 2014;40:153–160. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.181.
16. **Zenkov A., Yankovsky S., Matveeva A., Lavrinenko S., Gromov A.** Research of heat rates effect on the process of fuel-bed gasification of «Balakhtinskoe», «Osinnikovskoe», «Krasnogorskoe» and «Borodinskoe» coal deposits // MATEC Web of Conferences. Ser.: Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy — Technical and Technological Equipment. HMTTSC 2016. 2016. C. 01131.
17. **Medic D., Darr M., Shah A., Potter B., Zimmerman J.** Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading // Fuel. 2012; 91:147–154. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.07.181.
18. **Wannapeera J., Fungtammasan B., Worasuwannarak N.** Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass // J. Anal. Appl. Pyrol. 2011;92:99–105. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.181.
19. **Niu Z., Liu G., Yin H., Wu D., Zhou C.** Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR // Fuel. 2016. Vol. 172. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.007.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЗНЕЦОВ Гений Владимирович — доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: kuznetsov@tpu.ru

ЯНКОВСКИЙ Станислав Александрович — ассистент Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: jankovsky@tpu.ru

REFERENCES

1. **Alessandro Franco, Ana R. Diaz.** The future challenges for «clean coal technologies»: Joining efficiency increase and pollutant emission control // Dipartimento d'Energetica «L. Poggi», Università di Pisa. 17 November 2008. Vol. 34. Issue 3. P. 348–354. Available online <http://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>
2. **Termuehlen H., Empsperger W.** Clean and efficient coal fired power plants. New York: ASME Press, 2003.
3. International Energy Agency. Key world energy statistics 2007 / International Energy Agency (IEA): Paris, France. 2007. See also: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf.
4. BP statistical review of world energy / BP, London, UK, June 2008. See also: <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622S>.
5. **Fedyukhin A.V., Maikov I.L., Sinelshchikov V.A.** Comparison of kinetic models of biomass thermal decomposition // Book of Abstracts of International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Nalchik, Russia. 2011. P. 114–115.
6. **Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Salomatov V.V.** The influence of heat transfer conditions on the parameters characterizing the ignition of coal-water fuel particles. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. Vol. 62. Issue 10. 2015. Article number A002. P. 703–707. DOI: 10.1134/S0040601515100092
7. **Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V.** Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. Vol. 51. Issue 4. 22 July 2015. P. 409–415. DOI: 10.1134/S0010508215040024
8. **Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.** Differences in the ignition characteristics of coal–water slurries and composite liquid fuel. *Solid Fuel Chem.* 2016. 50: 88. DOI: 10.3103/S0361521916020117
9. **Vershinina K.Yu. [et al.]**. Experimental Study of the Ignition of Single Drops of Coal Suspensions and Coal Particles in the Oxidizer Flow [Electronic resource]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics : Scientific Journal*. — 2017. — Vol. 90. Iss. 1. — P. 198–205. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-017-1556-3>
10. **Oladejo Jumoke M., Adegbite Stephen, Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez Ashak M., Wu Tao.** A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass. *Applied Energy, Elsevier*. 2017. Vol. 188(C). P. 215–225.
11. **Agnieszka Plis, Michalina Kotyczka-Morańska, Marcin Kopczyński, Grzegorz Łabojko.** Furniture wood waste as a potential renewable energy source. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016. Vol. 125. Issue 3. P. 1357–1371. DOI: 10.1007/s10973-016-5611-7
12. **Ushakov A.G., Ushakova Ye.S., Ushakov G.V.** Tverdoye kompozitsionnoye toplivo na osnove otkhodov ugolnykh predpriyatiy i izbytochnogo aktivnogo ilya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 3(202). S. 70–79. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/4866.pdf>
13. **David N., John Z.** Cofiring Biomass and Coal for Fossil Fuel Reduction and Other Benefits—Status of North American Facilities in 2010. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-867 / Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station*. 22 p. https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr867.pdf (August 2012)
14. **Van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A., Ptasinski K.J.** Biomass upgrading by torrefaction: the production of biofuels. *Biomass Bioenergy*. 2011:35:3748–3762.
15. **Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalo J.P.S.** A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renew Sustain Energy Rev.* 2014:40:153–160. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.181.
16. **Zenkov A., Yankovsky S., Matveeva A., Lavrinenko S., Gromov A.** Research of heat rates effect on the process of fuel-bed gasification of «Balakhtinskoe», «Osinnikovskoe», «Krasnogorskoe» and «Borodinskoe» coal deposits. *MATEC Web of Conferences Ser. «Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy — Technical and Technological Equipment*. HMTTSC 2016. 2016. S. 01131.
17. **Medic D., Darr M., Shah A., Potter B., Zimmerman J.** Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*. 2012: 91:147–154. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.181.
18. **Wannapeera J., Fungtammasan B., Worasuwannarak N.** Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *J Anal Appl. Pyrol.* 2011:92:99–105. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.181.
19. **Niu Z., Liu G., Yin H., Wu D., Zhou C.** Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR. *Fuel*. 2016. Vol. 172. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.007.

AUTHORS

KUZNETSOV Genii V. — National Research Tomsk polytechnic university. E-mail: kuznetsovgv@tpu.ru

YANKOVSKY Stanislav A. — National Research Tomsk polytechnic university. E-mail: jankovsky@tpu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 29 апреля 2017 г.