

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

ИСЛАМОВА С.И., ВАЧАГИНА Е.К.

КазНЦ РАН

Наибольший интерес для решения проблем термической утилизации древесной биомассы представляют методы термохимической конверсии на основе газификации с получением тепловой и электрической энергии. В данной работе представлена методика оценки эффективности преобразования энергии при газификации древесной биомассы с использованием методов теплового и термодинамического анализа. Составлены тепловые и эксергетические балансы, найдены тепловые и эксергетические КПД газификаторов; значения тепловых КПД колеблются от 40,4 до 96,7 %, эксергетических – от 17,0 до 58,2 %.

Ключевые слова: древесная биомасса, утилизация, термохимическая конверсия, газификация, термодинамический анализ, эксергия.

Введение

Процесс обработки и переработки древесины связан с получением большого количества отходов. Начиная с рубки леса и вывоза хлыстов и заканчивая обработкой древесины, процесс сопровождается отходом части древесины, которая не используется в дальнейшем производстве. Ежегодное количество отходов и неделовой древесины по стране составляет около 300 млн м³. В настоящее время эффективная утилизация древесных отходов является актуальной с экологической точки зрения, в свете сохранения природной среды.

Рациональное и эффективное использование древесной биомассы в энергетических целях, как возобновляемого и экологически безопасного сырья, открывает возможность получения тепловой и электрической энергии, вторичных энергоносителей (газообразных – синтез-газ, водород; твердых – древесный уголь, гранулированное и брикетированное биотопливо; жидких – био-масло) и различных перспективных высокотехнологичных материалов.

Наибольший интерес для решения проблем утилизации древесных отходов и использования их в энергетических целях представляют методы термохимической конверсии с последующим получением тепловой и электрической энергии. Из них более простым методом, но менее эффективным является термическая переработка древесной биомассы путем прямого сжигания. Более сложным, но более эффективным и перспективным является метод термохимической конверсии древесной биомассы на основе газификации.

Газификация представляет собой процесс неполного окисления древесной биомассы газифицирующим агентом при высокой температуре с получением газообразного энергоносителя – генераторного газа. В качестве окислителя при газификации применяют: воздух; смесь водяного пара с воздухом или кислородом; воздух, обогащённый кислородом. С энергетической точки зрения газификацию от сжигания отличает то, что при горении вся энергия газа находится в форме физической

теплоты, а при газификации часть химической энергии, содержащейся в биомассе, переходит к газу.

При газификации в газогенераторе происходят следующие процессы.

1. Сушка. На этом этапе содержание влаги в биомассе обычно уменьшается до 5–35 %. В зоне сушки температура составляет около 100–200 °С.

2. Пиролиз – это первый этап газификации биомассы. Биомасса нагревается в отсутствие воздуха до 350–600 °С, и образуются древесный уголь, газы, пары смолы.

3. Сжигание. Происходит реакция между твердой карбонизированной биомассой и кислородом в воздухе, в результате чего образуется CO_2 . Водород, присутствующий в биомассе, также окисляется, образуя воду. При окислении углерода и водорода выделяется большое количество теплоты.

4. Восстановление. В отсутствие кислорода происходит несколько восстановительных реакций (в основном эндотермических) в интервале температур 600–1000 °С.

Использование древесной биомассы в качестве сырья для газификации, с последующей комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии в цикле парогазовых установок (ПГУ), должно сопровождаться применением передовых энергоэффективных технологий. Комбинированные циклы ПГУ на основе газификации древесной биомассы обладают потенциалом для эффективной, экономичной и экологически чистой выработки электроэнергии, но необходимы исследования для повышения их энергетической эффективности и производительности [1–6].

Целью работы является исследование эффективности преобразования энергии при газификации древесной биомассы с использованием методов термодинамического анализа для повышения энергетической эффективности и производительности комбинированных циклов ПГУ. Использование понятий эксергии и эксергетического баланса дает возможность количественно определить влияние необратимости термодинамических процессов на эффективность преобразования энергии.

Описание объектов исследования

Для оценки и сравнения тепловой и термодинамической эффективности рассмотрено несколько процессов газификации идентичной по элементарному составу биомассы с воздушным и паровым дутьем.

На рис. 1 показана схема газификации древесной биомассы высокотемпературным газифицирующим агентом (HTAG) [7]. Согласно данной технологии исходное сырье (древесные пеллеты) подается через верхнюю часть вертикального цилиндрического реактора системой непрерывной подачи с помощью четырех синхронизированных винтов.

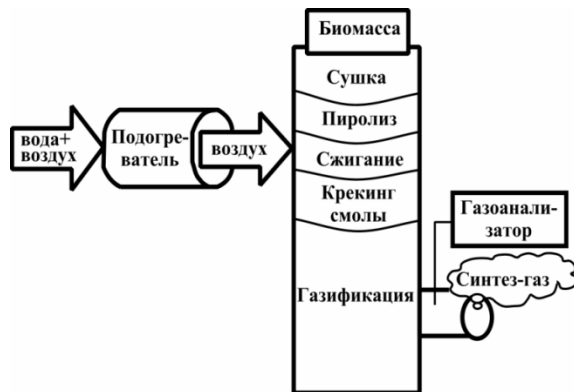


Рис. 1. Схема газификации древесной биомассы высокотемпературным газифицирующим агентом

Газифицирующий агент (воздух или паровоздушную смесь) предварительно нагревают до 1000–1100 °С в регенеративном подогревателе, а затем вводят в реактор сбоку. Решетка останавливает движущуюся биомассу или угольные частицы, образуя, таким образом, фиксированный слой древесного угля. Пиролизные газы, смешанные с газами, выделяющимися при сгорании, проходят через решетку и образуют генераторный газ, который отбирается на выходе из газогенератора. Температура измеряется с помощью термопар, расположенных вдоль высоты реактора в различных реакционных зонах. Газогенератор работает при атмосферном давлении.

Процесс газификации, описанный в работе [8], проводится в газификаторе прамоточного потока с неподвижным слоем биомассы (миндальной скорлупы). Система подачи биомассы периодическая (рис. 2). Газификатор снабжен портом зажигания, расположенным на уровне сужающейся части реактора и устройства вибрации решетки. Поток воздуха регулируется с помощью ручного клапана и равномерно распределяется внутри реактора через множество форсунок. Для обеспечения полного удаления из синтез-газа смолы, пыли и паров воды газ охлаждается и очищается, проходя через холодильник, водяное барботажное устройство, слой активированного угля и фильтр тонкой очистки.

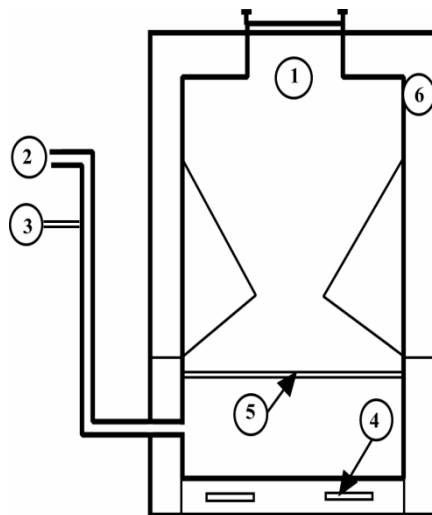


Рис. 2. Газификационная установка с воздушным дутьем:

1 – подача биомассы; 2 – выход генераторного газа; 3 – линия отбора газа; 4 – сборник золы;
5 – перфорированная решетка; 6 – изоляция

Согласно процессу, описанному в работе [3], установка непрерывной газификации оснащена газогенератором, циклоном очистителем, холодильником, воздуходувкой, горелкой, смесительным устройством и двигателем внутреннего сгорания. В качестве топлива использовалась древесная биомасса.

На рис. 3 представлена схема газогенераторной станции (ГГС) на древесной щепе [9]. Шахта газогенератора футерована огнеупорным кирпичом. Дутье осуществляется от воздуходувок высокого давления. Для увлажнения воздуха, подаваемого в газогенератор, используется пар от заводской котельной. Температура паровоздушного дутья регулируется в пределах 45–60 °С. Газ из газогенератора по горловине поступает в кольцевой коллектор, расположенный вдоль наружных стен здания, в котором установлены газогенераторы. Из кольцевого коллектора газ поступает в газовый коллектор. После электроочистки газ, пройдя два коллектора, направляется в скрубберы для извлечения уксусной кислоты и охлаждения.

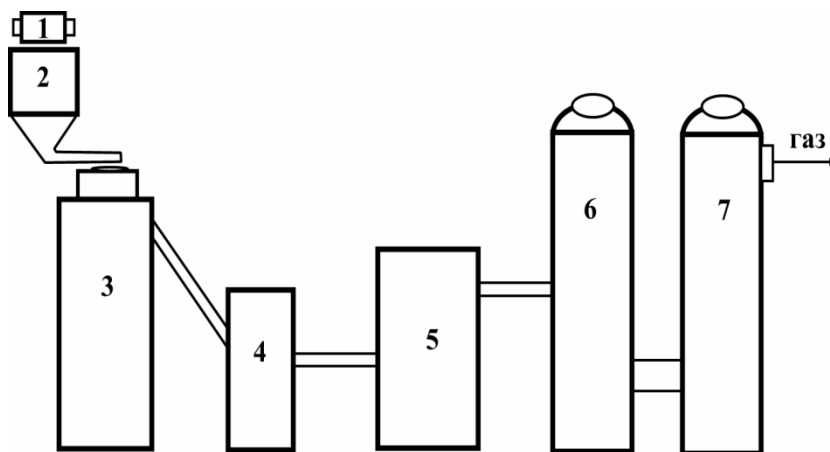


Рис. 3. Схема газогенераторной станции:

1 – транспортер для щепы; 2 – бункер для щепы; 3 – газогенератор; 4 – гидрозатор;
5 – электрофильтр; 6 – солевой скруббер; 7 – промывной скруббер

Расчетная часть

Исследование эффективности преобразования энергии при газификации древесины включает в себя оценку тепловой и термодинамической эффективности газогенератора согласно следующей методике [7,8, 10-12].

Оценка тепловой эффективности газогенератора основывается на определении действительных значений тепловой мощности потоков энергии и вещества на входе и выходе их аппарата. Распределение энергии в системе находим по следующему выражению:

$$\sum inH = \sum outH,$$

где $\sum inH$ и $\sum outH$ – энтальпии всех входящих и выходящих потоков.

Тепловая эффективность как показатель общей производительности процесса определяется по выражению

$$\eta_{ЭН} = \frac{m_{газ} \cdot LHV_{газ}}{m_{биом} \cdot LHV_{биом} + H_{агент}},$$

где $m_{газ}$ и $m_{биом}$ – массовый расход генераторного газа и биомассы, кг/с; $LHV_{газ}$ и $LHV_{биом}$ – низшая теплота сгорания генераторного газа и биомассы, МДж/кг; $H_{агент}$ – поток энергии, создаваемый высокотемпературным газифицирующим агентом, МДж/кг.

Оценка тепловой эффективности дает представление о количественной характеристике процессов, происходящих в газогенераторе. Поэтому для получения наиболее полной картины изменения потоков энергии необходима оценка эксергетической эффективности, которая позволит оценить процесс с качественной стороны.

Эксергетический баланс системы имеет вид:

$$Ex_{биом} + Ex_{агент} = Ex_{газ} + Ex_{смола} + Ex_{зола} + I,$$

где $Ex_{биом}$, $Ex_{агент}$, $Ex_{газ}$, $Ex_{смола}$, $Ex_{зола}$ – эксергии биомассы, газифицирующего агента, генераторного газа, смолы и золы соответственно; I – потери от необратимости.

В схематичном виде распределение потоков эксергии при газификации биомассы можно представить в виде диаграммы Сэнки (рис. 4).

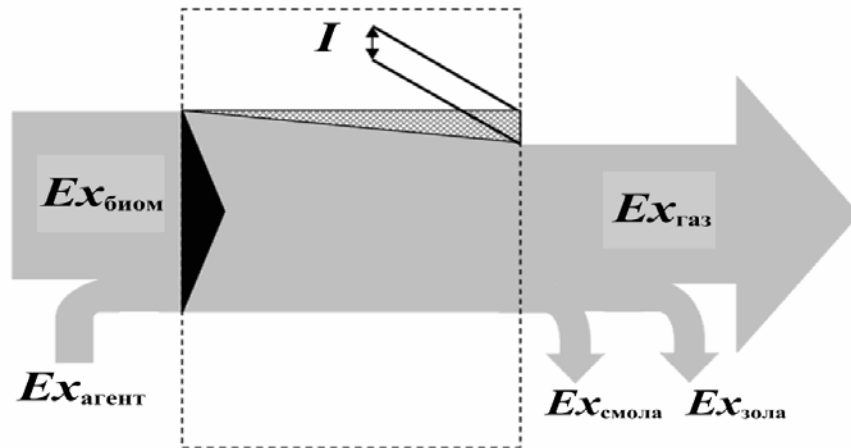


Рис. 4. Диаграмма эксергетических потоков газификатора

Эксергия материального потока может быть рассчитана как сумма его химической $Ex_{хим}$ и физической эксергии $Ex_{физ}$:

$$Ex = Ex_{хим} + Ex_{физ}.$$

Кинетической эксергией и другими видами эксергии можно пренебречь. Физическая эксергия газообразного вещества и угольного остатка рассчитывается как

$$Ex_{физ} = \sum_i x_i \cdot ex_i^{физ},$$

где индекс i – компонент газа или смола; x_i и $ex_i^{физ}$ – молярный расход и физическая эксергия компонента i соответственно.

Для каждого компонента газа физическая эксергия определяется как

$$Ex_{физ} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0),$$

$$h - h_0 = \int_{T_0}^T c_p dT;$$

$$s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT,$$

где h и s – удельная энтальпия и энтропия, соответственно, в состоянии, характеризующемся температурой T ; h_0 и s_0 – энтальпия и энтропия при температуре T_0 и давлении 1 атм; c_p – удельная изобарная теплоемкость, кДж/кмольК.

Химическая эксергия определяется из следующего выражения:

$$Ex_{хим} = \sum_i x_i \cdot (ex_i^{хим} + R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{x_i}{\sum x_i}),$$

где $ex_i^{хим}$ – стандартная химическая эксергия газообразного компонента i ; R – универсальная газовая постоянная (8,314 кДж/кмольК).

Так как биомасса подается при температуре окружающей среды, то физической эксергией биомассы можно пренебречь. Химическая эксергия биомассы вычисляется как

$$Ex_{\text{биом}} = m_{\text{биом}} \cdot \beta \cdot LHV_{\text{биом}},$$

где β – корреляционный фактор для древесины – определяется по следующей формуле:

$$\beta = \frac{1,0414 + 0,0177\left(\frac{H}{C}\right) - 0,3328\left(\frac{O}{C}\right) \cdot \left[1 + 0,0537\left(\frac{H}{C}\right)\right]}{1 - 0,4021\left(\frac{O}{C}\right)},$$

где C, H, O – мольные доли фракций углерода, водорода и кислорода в составе древесины соответственно.

Эксергию смолы можно вычислить на основе следующего выражения:

$$Ex_{\text{см}} = Ex_{\text{см}}^{\text{физ}} + Ex_{\text{см}}^{\text{хим}},$$

где физическая составляющая эксергии вычисляется по выражению

$$Ex_{\text{см}}^{\text{физ}} = m_{\Gamma} \cdot (x_{\text{см}} \cdot c_{p,\text{см}} \cdot (T_{\Gamma} - T_0) - T_0 \cdot x_{\text{см}} \cdot c_{p,\text{см}} \ln \frac{T_{\Gamma}}{T_0}),$$

где m_{Γ} – массовый расход синтез-газа, кг/с; $x_{\text{см}}$ – массовая доля смолы, кг/кг; $c_{p,\text{см}}$ – удельная теплоемкость смолы, кДж/кг·К; T_{Γ} – температура синтез-газа.

Химическая эксергия смолы вычисляется по формуле

$$Ex_{\text{см}}^{\text{хим}} = m_{\Gamma} \cdot x_{\text{см}} \cdot \beta_{\text{см}} \cdot Q_{\text{см}},$$

где $Q_{\text{см}}$ – теплота сгорания смолы, кДж/кг; $\beta_{\text{см}}$ – корреляционный фактор для смолы.

Используя корреляцию для жидких топлив,

$$\beta = \left[1,0401 + 0,1728\left(\frac{H}{C}\right) + 0,0432\left(\frac{O}{C}\right) \right].$$

Эксергию золы можно вычислить по следующей формуле:

$$Ex_{\text{зола}} = P \cdot \frac{x_3 \cdot n}{12} \cdot ex_3^{\text{хим}},$$

где P – скорость потери веса древесной биомассы (на основе опытных данных), кг/с; x_3 – массовая доля золы, кг/кг; n – массовая доля биомассы; $ex_3^{\text{хим}}$ – стандартная химическая эксергия, кДж/кмоль.

Эксергетическая эффективность процесса газификации вычисляется по выражению

$$\eta_{\text{ЭХ}} = \frac{Ex_{\text{газ}}^{\text{хим}}}{Ex_{\text{биом}} + Ex_{\text{агент}}}.$$

Результаты исследования

По представленной методике проведен анализ тепловой и термодинамической эффективности процессов газификации биомассы. Расчетные значения физической и химической эксергии синтез-газа, биомассы и газифицирующего агента, а также низшей теплоты сгорания представлены в таблице, значения тепловой и эксергетической эффективности газификаторов показаны на рис. 5.

Таблица

Значения эксергии и низшей теплоты сгорания биомассы, синтез-газа и газифицирующего агента

Показатель	(НТАГ) [7]	ГУ [3]	Downdraft gasifier[8]	ГГС [9]
Биомасса				
Химическая эксергия, кВт	122,22	11,51	23,56	4567,10
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	17600	16579	18338	12034
Синтез-газ				
Физическая эксергия, кВт	37,97	8,59	9,76	43,15
Химическая эксергия, кВт	11,00	2,05	3,94	734,72
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	5617	4177	3349	5849
Газифицирующий агент				
Физическая эксергия, кВт	15,29	0,0003	0,0005	5,18

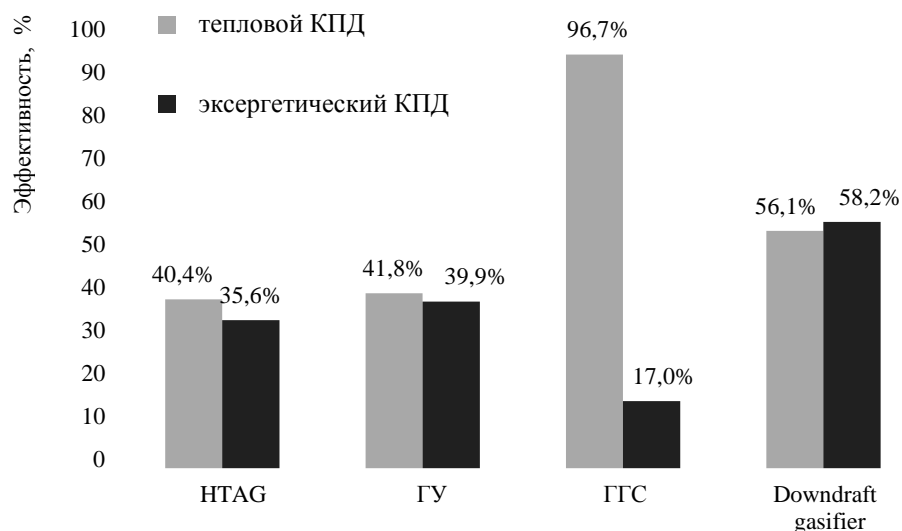


Рис. 5. Сравнение тепловой и эксергетической эффективности процессов газификации древесной биомассы

Наибольшей теплотой сгорания обладает генераторный газ, получаемый при газификации древесных пеллет с воздушным дутьем и древесной щепы с паровоздушным дутьем.

На величину термодинамической эффективности процесса газификации влияют различные факторы, в частности: расход сырья, объем получаемого синтез-газа, его температура и теплота сгорания, а также тип, температура и расход газифицирующего агента.

Процесс газификации древесных пеллет с высокотемпературным окислителем характеризуется средними значениями теплового и эксергетического КПД (40,4% и 35,6% соответственно). Чуть выше значения тепловой и эксергетической эффективности у газогенератора процесса непрерывной газификации древесной биомассы (41,8% и 39,9%).

Наибольшей тепловой эффективностью (96,7%) характеризуется процесс газификации древесной щепы на ГГС с окислителем в виде паровоздушной смеси. При этом у данного процесса низкая эксергетическая эффективность (17%). Также средними значениями теплового и эксергетического КПД (56,1% и 58,2% соответственно) характеризуется процесс газификации биомассы с предварительным поджегом с воздушным дутьем.

Основной потерей теплоты по энергетическому балансу являются потери с отходящим синтез-газом, которые, в свою очередь, зависят от избытка воздуха в газогенераторе и температуры газа. Основными потерями по эксергетическому балансу являются потери от неравновесности процесса горения. Низкий термодинамический КПД газогенератора также обусловлен потерями, возникающими в процессе передачи теплоты от биомассы, обладающей химической энергией высокого потенциала, к синтез-газу. Уменьшению потерь по эксергетическому балансу способствует повышение температуры газифицирующего агента.

Заключение

Проведена оценка эффективности преобразования энергии процессов газификации древесной биомассы, позволяющая разработать мероприятия по повышению энергетической эффективности и производительности комбинированных циклов ПГУ. В результате теплового и термодинамического анализа процессов газификации древесной биомассы составлены тепловые и эксергетические балансы, определены значения тепловых и эксергетических КПД газификаторов. Значения тепловых КПД колеблются от 40,4 до 96,7 %, эксергетических – от 17,0 до 58,2 %.

Summary

Greatest interest to solve problems of the thermal utilization of wood biomass are thermochemical conversion techniques based on gasification to produce heat and electricity. In this work a methodology for evaluating the efficiency of energy conversion during the gasification of woody biomass using methods of thermal and thermodynamic analyze is presented. The thermal and exergetic balances are compiled, the thermal and exergy efficiency of gasifiers is determined; thermal efficiency values range from 40.4 to 96.7 %, exergetic efficiency - from 17.0 to 58.2 %.

Keywords: wood biomass, biomass, recycling, thermo chemical conversion, gasification, thermodynamic analysis, exergy.

Литература

1. Гаврилова М. Рациональное использование отходов деревообработки: у всех на словах, но только не на деле // Лесной комплекс Сибири. 2013. № 3. С. 44-46.
2. Puigjaner L. Syngas from waste. Emerging Technologies. Springer, 2011. 329 p.

3. Федюхин А.В. Разработка систем комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе исследования процессов пиролиза и газификации биомассы: Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2014. 20 с.
4. Panwara N.L., Kothar R. i, Tyagi V.V. Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. №16. Pp. 1801–1816.
5. Yadav P., Dutta A., Gupta Dr. Bh., Pandey Dr. M. Performance Analysis of the Constructed Updraft Biomass Gasifier for Three Different Biomass Fuels // International Journal of Modern Engineering Research. 2013. Vol. 3, Issue. 4. Pp. 2056–2061.
6. Soltani S., Athari H., Rosen M. A., Mahmoudi S. and Morosuk T. Thermodynamic Analyses of Biomass Gasification Integrated Externally Fired, Post-Firing and Dual-Fuel Combined Cycles // Sustainability. 2015. №7. Pp. 1248-1262.
7. Wu Y., Yang W., Blasiak W. Energy and Exergy Analysis of High Temperature Agent Gasification of Biomass // Energies. 2014. №7. Pp. 2107-2122.
8. Masmoudi M.A., Grioui N., Sahraoui M. and Halouani K. Experimental study of syngas generation from almond shell in a downdraft gasifier // 16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013). Marrakech. Maroc. 2013.
9. Лямин В.А. Газификация древесины. М.: Лесная промышленность, 1967. 262 с.
10. Medina, B.F., Herrera, I., Zanzi, R., Rubio, A., Cruz, O. Exergetic evaluation of pyrolysis process of *Dichrostachys Cinerea* // 16th European Biomass Conference and Exhibition. Valencia. Spain. 2008. Pp. 1198-1199.
11. Jarungthammachote S., Dutta A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier // Energy. 2007. №32. Pp. 1660–1669.
12. Janoszek T. Exergy analysis of the coal gasification process in ex-situ conditions // J. Sust. Min. 2013. Vol. 12, No. 3. Pp. 32–37.

Поступила в редакцию

19 октября 2015 г.

Исламова Светлана Ивановна – канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории ЭТПИЭ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук (Каз НЦ РАН). Тел: 8(951)8940604. E-mail: isvetulia@mail.ru.

Вачагина Екатерина Константиновна – докт. техн. наук, зав. лаб. ТФИ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук (Каз НЦ РАН). E-mail: evachagina@mail.ru.