УДК 662.7

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО ДУТЬЯ

**Донской И.Г.**

*Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
*Институт систем энергетики им.Л.А.Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия*

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда №15-19-10025

**АННОТАЦИЯ**

В работе проведено расчетное исследование влияния параметров подачи вторичного дутья (места подачи и расхода) при обращенной слоевой газификации твердых топлив. Расчеты проведены для угольного кокса (97 % углерода) и древесной биомассы (49,5 % углерода в составе органической массы). Результаты показывают, что в случае газификации кокса определяющим фактором является устойчивость режима процесса с одним очагом горения. При газификации биомассы эффективность конверсии определяется степенью окисления смолистых веществ. Обсуждаются границы области применимости полученных результатов.

## ВВЕДЕНИЕ

Газификация твердых топлив позволяет получать горючий газ из угля, биомассы, торфа и других твердых топлив. Полученный генераторный газ может быть использован как топливо для производства тепло- и электроэнергии. Одной из главных задач в развитии газогенераторной техники является повышение эффективности процесса газификации, т.е. организация его таким образом, чтобы достичь наибольшей конверсии твердого топлива в горючие газы, которые нуждались бы в минимально возможной очистке от соединений серы и смолистых веществ.

Широко используемые способы повышения эффективности процесса газификации заключаются в увеличении температуры и давления (обогащение дутья кислородом [1], перегрев дутья [2] и т.д.). В этом случае, однако, наблюдаются значительные потери в системах очистки газа [3]. Среди других способов можно указать на термоподготовку топлива [4], использование катализаторов и сорбентов [5-7]. Особняком нужно выделить ступенчатые процессы конверсии [8-13]. Такие процессы позволяют без катализаторов и предварительной подготовки топлива получить газ с низким содержанием смол, а также снизить температуру выходящего газа, что способствует повышению химического КПД процесса.

Основная идея ступенчатой газификации – разделение процесса на отдельные стадии, которое может достигаться как за счет работы параллельных реакторов конверсии [8, 9, 12], так и за счет ступенчатого распределения теплоты и дутья в одном реакторе [14-19]. При этом выделяющаяся в процессе теплота должна усваиваться «на месте» (например, в аллотермических химических превращениях). Такие меры приводят к выравниванию температурного профиля в системе, снижают перепад удельной химической энергии на выходе и выходе из газогенератора [20].

Процессы с разнесенными в пространстве стадиями пиролиза и газификации рассматриваются в работах [8, 9, 21, 22]. Теоретически и экспериментально показано, что при этом возможно получение качественного газа и достижение высоких значений химического КПД процесса газификации. Тем не менее, представляет интерес исследование и других способов управления процессом газификации. Среди них можно выделить использование вторичного дутья.

Использование вторичного дутья (при оптимальной организации процесса) позволяет достичь ряда полезных эффектов, в первую очередь достаточно полной конверсии смолистых продуктов (что особенно актуально для газификации биомассы). При этом расширяются возможности управления процессом, например, при работе газогенератора на разных топливах. При газификации низкореакционных топлив (угли высокой степени метаморфизма) повышение температуры в зоне восстановления за счет частичного сжигания газа позволяет интенсифицировать процесс.

© Донской И.Г.

В настоящей работе приведены результаты расчетов обращенного процесса слоевой газификации для двух топлив: кокса и древесины. Обсуждаются особенности процесса в каждом отдельном случае. Указываются некоторые возможности использования полученных результатов для управления слоевыми процессами газификации.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

В ряде работ [16-19] были проведены экспериментальные исследования по влиянию вторичного дутья на эффективность процесса слоевой конверсии биомассы, которые показали, что при использовании вторичного дутья возможно на порядок снизить содержание смолы в газе. При этом возрастает химический КПД, в первую очередь за счет получения из смол горючих газов. Эти исследования качественно подтверждают выводы теоретической работы [23], где на основании серии расчетов была получена зависимость характеристик процесса от места подачи и расхода вторичного дутья. В этой же работе решался вопрос об оптимальных условиях подачи вторичного дутья: по результатам расчетов, чем больше доля вторичного дутья и чем дальше от начала слоя оно подается, тем выше содержание горючих компонентов. Выход смолы при изменении доли вторичного дутья или места его подачи имеет экстремум. Авторы работы [23] объясняют этот факт структурой реакционной зоны: при переходе от однофронтовой структуры (с одним очагом горения) к двухфронтовой (с двумя очагами) достигается наиболее эффективная конверсия смолистых веществ.

В настоящей работе предлагается расчет с использованием другой математической модели. Рассматривается одномерный слой частиц топлива (пространственная координата – высота слоя), через который фильтруется воздух. Технические параметры топлива и реактора приведены в табл. 1. Расчеты проводились для двух топлив: кокса (содержание углерода близко к 100%) и древесины (содержание углерода ок. 50%). Эти два крайних случая интересны для оценки эффективности вторичного дутья для топлив с отсутствием пиролитического разложения и топлив, для которых пиролиз является доминирующей стадией конверсии.

Математическая модель обращенного слоевого процесса газификации для стационарных условий изложена в работах [24]. Отличием от предложенных ранее модификаций этой модели является учет смолообразования. В связи со значительными сложностями описания реальной физико-химии образования и разложения смолистых соединений [25] применяется следующая упрощенная схема. Образование смолистых продуктов происходит при пиролизе с постоянной долей смол в продуктах пиролиза. Разложение смол происходит при достижении достаточной температуры (> 800 K) и концентрации кислорода (> 5 % об.). Кинетика термодеструкции моделируется дельта-функцией условий в реакторе. Кинетические параметры реагирования кокса и биомассы в аррениусовской форме приведены в табл. 2 (были получены в результате обработки данных термического анализа [26]).

Таблица 1

Параметры топлива и реактора

| Параметры реактора | |
|---|---|
| Длина | 0.5 м |
| Диаметр | 0.2 м |
| Расход топлива | 1 кг/ч |
| Размер частиц | 25 мм |
| Состав кокса (% масс.) | |
| $C^{daf}$ | 97,3 |
| $H^{daf}$ | 0,54 |
| $O^{daf}$ | 0,43 |
| $N^{daf}$ | 0,98 |
| $S^{daf}$ | 0,76 |
| $A^{d}$ | 7,4 |
| $W^{r}$ | 0,6 |
| Состав биомассы (% масс.) | |
| $C^{daf}$ | 49,5 |
| $H^{daf}$ | 6,3 |
| $O^{daf}$ | 44,2 |
| $V^{daf}$ | 85 |
| $A^{d}$ | 1 |
| $W^{r}$ | 20 |

Таблица 2

Кинетические константы гетерогенных брутто-реакций

| Брутто-реакция | Предэкспонент | Энергия активации (кДж/моль) |
|---|---|---|
| Кокс | | |
| $C + O_2$ | $1{,}71 \cdot 10^4$ м/с | 177 |
| $C + CO_2$ | $2{,}23 \cdot 10^7$ м/с | 266 |
| $C + H_2O$ | $1{,}76 \cdot 10^3$ м/с | 180 |
| Биомасса | | |
| Пиролиз | $5{,}4 \cdot 10^5$ 1/с | 96 |
| $C + O_2$ | $1{,}27 \cdot 10^{10}$ м/с | 142 |
| $C + CO_2$ | $7 \cdot 10^{10}$ м/с | 259 |
| $C + H_2O$ | $4{,}93 \cdot 10^5$ м/с | 175 |

В расчетах менялись место подачи вторичного дутья и его относительный расход. Полученные результаты дают «карты режимов» для соответствующих процессов. Для упрощения расчетов были приняты постоянные значения коэффициента избытка

окислителя для каждого топлива. Для «поджигания» реактора использовали инициирующий источник в начале слоя [27], который уменьшался до нуля в процессе расчетов. Суммарный коэффициент избытка окислителя при газификации кокса был принят равным 0,55; при газификации биомассы 0,45.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Типичные эпюры температур и концентраций по высоте слоя представлены на рис. 1, 2 (газификации для кокса) и рис. 3, 4 (для газификации биомассы). Вторичное дутье подается в слой на высоте 10 см от начала слоя. В обоих случаях в точке подачи вторичного дутья наблюдается характерный скачок концентрации и температуры. В случае биомассы этот скачок сглажен за счет окисления смол.

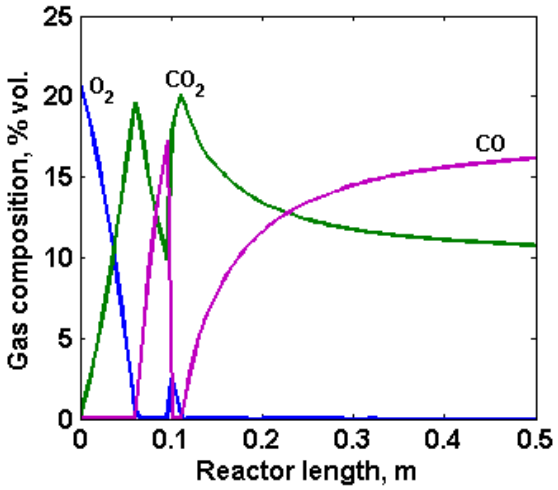


Рис. 1 Состав газа по высоте слоя при газификации кокса.

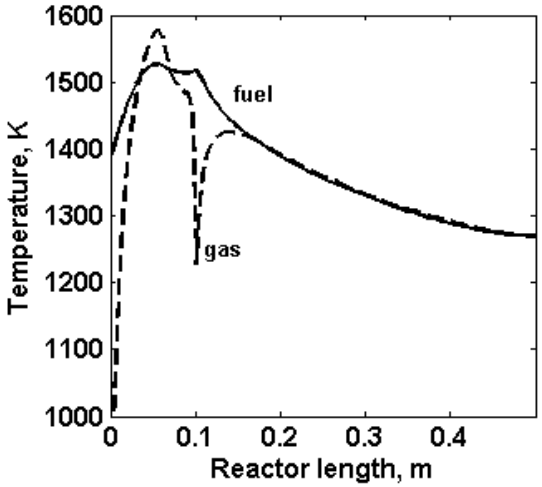


Рис. 2 Температура по высоте слоя при газификации кокса.

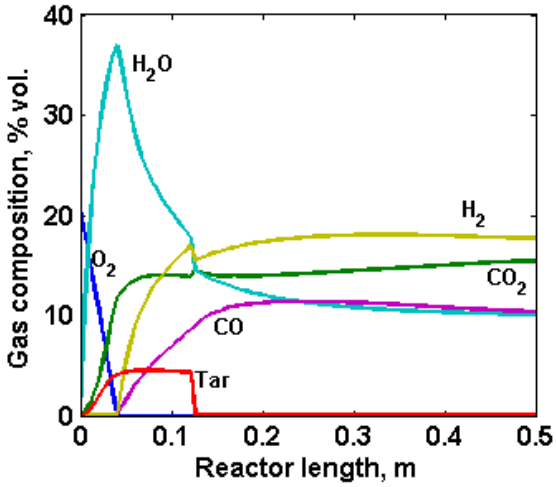


Рис. 3 Состав газа по высоте слоя при газификации биомассы.

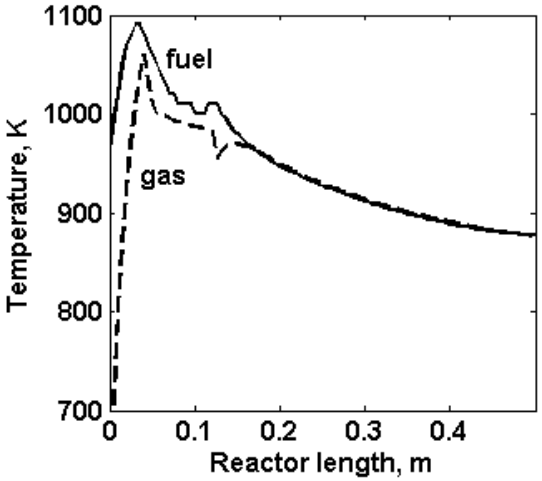


Рис. 4 Температура по высоте слоя при газификации биомассы.

Эффективность (химический КПД) воздушной газификации кокса с применением вторичного дутья отображена на рис. 5, эффективность газификации биомассы – на рис. 6. Из представленных рисунков видно, что кокс и биомасса демонстрируют качественно различное поведение. Химический КПД процесса газификации кокса имеет многоэкстремальную зависимость от переменных параметров; в случае газификации биомассы наблюдается единственный экстремум.

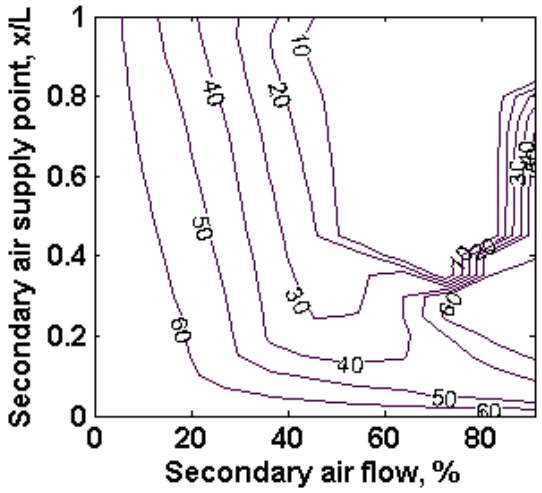


Рис. 5 Химический КПД газификации кокса в зависимости от параметров подачи вторичного воздуха.

Газификация кокса происходит наиболее эффективно в однофронтовом режиме (терминология работы [23]). В двухфронтовом режиме подача холодного воздуха в раскаленный слой снижает его локальную температуру и снижает выход горючих газов. Сжигание части газа в месте подачи вторичного дутья не восполняется гетерогенными реакциями: часть теплоты теряется через стенку реактора, часть теплоты уносится продуктами полного сгорания. Однако при высокой доле вторичного дутья и расположении места его подачи на расстоянии 10-20 см от первичного происходит смена режима с двухфронтового на однофронтовой. Первичного дутья становится недостаточно для того, чтобы инициировать горение, поэтому фронт горения смещается к месту подачи вторичного дутья. При этом химический КПД газификации становится практически таким же, как и без подачи вторичного дутья.

При высокой доле вторичного дутья и больших расстояниях между точками подачи первичного и вторичного процесс затухает. Это связано со снижением температуры вдали от первого фронта горения из-за эндотермических реакций и теплопотерь, на которое накладывается подача холодного дутья.

В случае газификации биомассы эффективность процесса определяется конверсией смолистых продуктов: чем выше температура и больше концентрация кислорода в точке подачи вторичного дутья, тем интенсивнее происходит разложение смол. Как видно из рис. 6, существует достаточно обширная область параметров, в пределах которых можно вести процесс газификации с высоким КПД (ок. 70%). Доля вторичного дутья при этом меняется в пределах 10-20 %. При более высоких расходах происходит, как и в случае кокса, тушение процесса при подаче холодного дутья в слой.

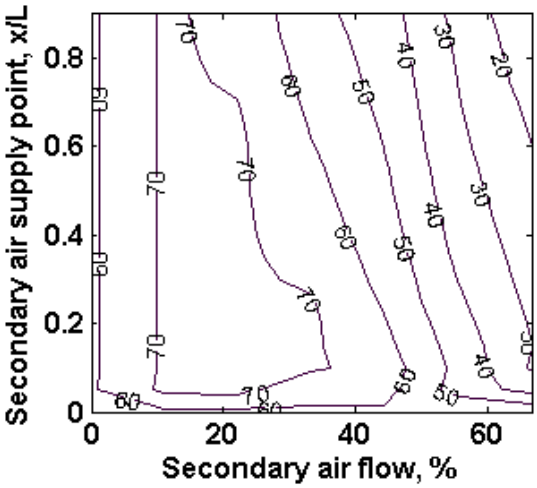


Рис. 6 Химический КПД газификации биомассы в зависимости от параметров подачи вторичного воздуха.

Стоит отметить ряд обстоятельств, ограничивающих область применимости результатов приведенного анализа (помимо упрощенной модели поведения смол в процессе). Во-первых, это постоянство суммарного коэффициента избытка окислителя; во-вторых, в расчетах не менялась точка «поджига» реактора; в-третьих, расход топлива задавался постоянным, т.е. предполагалось, что недогоревший остаток непрерывно удаляется из реактора (на самом деле расход топлива в слоевых процессах является производной величиной, которая определяется расходом дутья и тепловым режимом [27]). Расчеты с учетом поправок на эти эффекты могут быть объектом будущих исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проведены расчеты процессов воздушной слоевой газификации кокса и биомассы с использованием вторичного дутья. В расчетах варьировали долю вторичного дутья и точку его подачи в слой.
- В случае кокса наиболее эффективным является однофронтовой режим газификации, без подачи вторичного дутья. Устойчивостью однофронтового режима объясняет наличие нескольких экстремумов химического КПД в зависимости от переменных параметров.

- В случае биомассы эффективность режимов определяется эффективностью разложения смолистых продуктов. Теоретические оценки для оптимальной доли вторичного дутья дают величину 10-20 %.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. Grabner M. Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal. - Wiley-VCH, 2015. - 376 p.
2. Теплофизические проблемы создания угольной ПГУ с повышенной энергетической эффективностью / А.Ф. Рыжков, В.С. Белоусов, Т.Ф. Богатова, Н.В. Вальцев, С.И. Гордеев, П.В. Осипов, Н.А. Абаимов // XXXI Сибирский теплофизический семинар (17-19 ноября 2014 г., Новосибирск). Доклады. - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. - С. 449-453.

   Teplofizicheskie problemy sozdaniya ugolnoy PGU s povyshennoy energeticheskoy effektivnostyu / A.F. Ryzhkov, V.S. Belousov, T.F. Bogatova, N.V. Valtsev, S.I. Gordeev, P.V. Osipov, N.A. Abaimov // XXXI Sibirskiy teplofizicheskiy seminar (17-19 noyabrya 2014 g., Novosibirsk). Doklady. - Novosibirsk: IT SO RAN, 2014. - S. 449-453.
3. Giuffrida A., Romano M.C., Lozza G. Efficiency enhancement in IGCC power plants with air-blown gasification and hot gas clean-up // Energy. - 2013. - V. 53. - P. 221-229.
4. Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction // Energy. - 2006. - V. 31. - P. 3458-3470.
5. Mun T.-Y., Kim J.-W., Kim J.-S. Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier: Part 1. The effects and reusability of additives on the removal of tar and hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. - 2013. - V. 38. - P. 5226-5234.
6. A review om biomass gasification syngas cleanup / N. Abdoulmoumine, S. Adhikari, A. Kulkarni, S. Chattanathan // Applied Energy. - 2015. - V. 155. - P. 294-307.
7. 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.
8. The design, construction and operation of a 75 kW two-staged gasifier / U. Henriksen, J. Ahrenfeldt, T.K. Jensen, B. Gobel, J.D. Bentzen, C. Hindsgaul, L.H. Sorensen // Energy. - 2006. - V. 31. - P. 1542-1553.
9. The development of a computer model for a fixed bed gasifier and its use for optimization and control / B. Gobel, U. Henriksen, T.K. Jensen, B. Qvale, N. Houbak // Bioresource Technology. - 2007. - V. 98. - P. 2043-2052.
10. Pyrolysis of Pinus pinaster in a two-staged gasifier: Influence of processing parameters and thermal cracking of tar / W.F. Fassinou, L. Van de Steene, S. Toure, G. Volle, P. Girard // Fuel Processing Technology. - 2009. - V. 90. - P. 75-90.
11. Improving the performance of fluidized bed biomass/waste gasifiers for distributed electricity: A new three-staged gasification system / A. Gomez-Barea, B. Leckner, A.V. Perales, S. Nilsson, D.F. Cano // Applied Thermal Engineering. - 2013. - V. 50. - P. 1453-1462.
12. Biomass gasification and tar reforming in a two-stage reactor / B. de Caprariis, P. de Filippis, M. Scarsella, A. Petrullo, V. Palma // Energy Procedia. - 2014. - V. 61. - P. 1071-1074.
13. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // Progress in Energy and Combustion Science. - 2015. - V. 46. - P. 72-95.
14. Removal of tar by secondary air in fluidised bed gasification of residual biomass and coal / Y.G. Pan, X. Roca, E. Velo, L. Puigjaner // Fuel. - 1999. - V. 78. - P. 1703-1709.
15. Yong K.H. Method of gasification in IGCC system // International Journal of Hydrogen Energy. - 2007. - V. 32. - No. 18. - P. 5088-5093.
16. Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor / J.D. Martinez, E.E.S. Lora, R.V. Andrade, R.L. Jaen // Biomass and Bioenergy. - 2011. - V. 35. - P. 3465-3480.
17. Design and experimental investigation of a 190 kWe biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach / Z. Ma, Y. Zhang, Q. Zhang, Y. Qu, J. Zhou, H. Qin // Fuel. - 2012. - V. 46. - P. 140-147.
18. 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.
19. Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer gas quality through an innovative two-stage air and premixed air/gas supply approach / K. Jaojaruek, S. Jarungthammachote, M.K.B. Gratuito, H. Wongsuwan, S. Homhual // Bioresource Technology. - 2011. - V. 102. - P. 4834-4840.
20. Совершенствование способов получения синтез-газов из высокореакционных топлив / А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин, А.В. Попов, Т.Ф. Богатова, Н.В.


© Донской И.Г.

Вальцев // Современная наука. Сб. науч. ст. - 2011. - № 3(8). - С. 3-8.

Sovershenstvovanie sposobov polucheniya sintez-gazov iz vysokoreaktsionnykh topliv / A.F. Ryzhkov, V.E. Silin, A.V. Popov, T.F. Bogatova, N.V. Valtsev // Sovremennaya nauka. Sb. nauch. st. - 2011. - № 3(8). - S. 3-8.

21. Донской И.Г. Математическое моделирование ступенчатой газификации угля в плотном слое // Горение и плазмохимия. - 2013. - Т. 12. - № 4. - С. 376-382.

Donskoy I.G. Matematicheskoe modelirovanie stupenchatoy gazifikatsii uglya v plotnom sloe // Gorenie i plazmokhimiya. - 2013. - T. 12. - № 4. - S. 376-382.

22. Gasification of biomass with oxygen-enriched air in a pilot scale two-stage gasifier / Z. Wang, T. He, J. Qin, J. Wu, J. Li, Z. Zi, G. Liu, J. Wu, L. Sun // Fuel. - 2015. - V. 150. - P. 386-393.

23. Di Blasi C., Branca C. Modeling a stratified downdraft wood gasifier with primary and secondary air entry // Fuel. - 2013. - V. 104. - P. 847-860.

24. Расчет режимов слоевой газификации угля с помощью термодинамической модели с макрокинетическими ограничениями / И.Г. Донской, А.В. Кейко, А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, В.А. Шаманский // Теплоэнергетика. - 2013. - № 12. - С. 56-61.

Raschet rezhimov sloevoy gazifikatsii uglya s pomoshchyu termodinamicheskoy modeli s makrokineticheskimi ogranicheniyami / I.G. Donskoy, A.V. Keyko, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev, V.A. Shamanskiy // Teploenergetika. - 2013. - № 12. - S. 56-61.

25. Palma C.F. Modelling of tar formation and evolution for biomass gasification: A review // Applied Energy. - 2013. - V. 111. - P. 129-141.

26. Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion / A. Kozlov, D. Svishchev, I. Donskoy, A.V. Keiko // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. - 2012. - V. 109. - No. 3. - P. 1311-1317.

27. Донской И.Г., Шаманский В.А. Численное исследование процесса газификации угля и влияния режимных параметров на его интенсивность // Горение твердого топлива: Доклады VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13-16 ноября 2012 г. - Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2012. - С. 38.1-38.7.

Donskoy I.G., Shamanskiy V.A. Chislennoe issledovanie protsessa gazifikatsii uglya i vliyaniya rezhimnykh parametrov na ego intensivnost // Gorenie tverdogo topliva: Doklady VIII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, Novosibirsk, 13-16 noyabrya 2012 g. - Novosibirsk: Izd-vo IT SO RAN, 2012. - S. 38.1-38.7.