

УДК 621.438
С 32

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

С. И. Сербин, д-р техн. наук, проф.;
Н. А. Гончарова, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Приведены трехмерные расчеты процессов газификации угля в плазменной пылеугольной горелке. Проанализировано влияние состава газифицирующего агента на состав получаемого синтез-газа.

Ключевые слова: газификатор, уголь, плазма, синтез-газ.

Анотація. Наведено тривимірні розрахунки процесів газифікації вугілля в плазмовому пиловугільному пальнику. Проаналізовано вплив складу газифікуючого агента на склад одержуваного синтез-газу.

Ключові слова: газифікатор, вугілля, плазма, синтез-газ.

Abstract. The three-dimensional simulations of the gasification processes in a plasma coal combustor are performed. Influence of oxidizing composition on received synthesis gas composition is analyzed.

Keywords: gasifier, coal, plasma, synthesis gas.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Технология газификации угля имеет стратегическое значение для Украины. Уголь является перспективным энергоносителем XXI века. Сегодня доля его в топливном балансе тепловых электростанций увеличивается. В то же время качество энергетических углей повсеместно снижается, что ведет к трудностям его воспламенения и сжигания. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать новые технологии сжигания и газификации низкосортных углей [1, 2]. Для повышения эффективности сжигания угля и снижения вредных выбросов нужно создание новых плазменно-топливных систем (ПТС), обеспечивающих стабилизацию пылеугольного факела, снижающих механический недожог топлива и образование оксидов азота.

Одним из перспективных направлений применения ПТС является использование их для газификации низкосортных углей и получения высококалорийного синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$) для последующего сжигания в камерах сгорания газотурбинных двигателей [5, 6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В основе плазменной технологии лежит электротермохимическая подготовка топлив к сжиганию, которая заключается в нагреве электродуговой плазмой небольшой части аэросмеси до температуры полного выделения летучих и частичной газификации коксового остатка.

Анализ последних публикаций показывает, что использование плазмы приводит к многократному ускорению термохимических превращений топлива и окислителя, а следовательно, и более полному и быстрому выгоранию пылеугольного факела [6, 7, 9]. Особенности плазموхимических технологий являются

процессы образования радикалов и ионов при диссоциации плазмообразующего газа, что обуславливает высокую скорость протекания физико-химических превращений при высокой концентрации энергии в единице объема. Эти особенности взаимодействия плазмы с пылеугольным топливом повышают энергетическую эффективность плазменной газификации топлива в 3–4 раза по сравнению с традиционными процессами [3].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — определение и сравнение основных параметров плазменно-топливной системы при использовании газифицирующих агентов различного состава для создания эффективной конструкции плазменно-угольной горелки.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Трехмерные имитационные расчеты систем плазмохимической газификации угля проводятся с целью выявления особенностей аэродинамической структуры реагирующих потоков в условиях турбулентного взаимодействия, а также оптимизации характеристик рабочих процессов с точки зрения минимизации энергопотребления и токсичных выбросов.

Использование методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет проводить многовариантные расчеты и дает необходимую информацию о структуре потока в условиях неизотермичности, о распределении концентраций основных продуктов газификации и токсичных компонентов в сечениях плазменного газификатора.

При разработке модели плазмохимической газификации угля выбраны и обоснованы соответствующие модели турбулентности, смешения топлива и газифицирующего агента.

Эти математические модели принимают форму систем дифференциальных и алгебраических уравнений,

решения которых в важнейших аспектах полностью согласуются с характеристиками элементов моделируемого устройства или процесса. Модель рассматривается как идеализированное или неполное описание фактически существующих зависимостей между конструктивными и рабочими характеристиками плазменного газификатора, с одной стороны, и фундаментальными законами физики и химии — с другой. Исследование процессов газификации на уровне математического моделирования является промежуточным звеном между исследованиями, проводимыми на уровнях инженерной практики и фундаментальной науки.

Разработанная модель химически реагирующих потоков основана на решении систем уравнений, описывающих конвективный, диффузионный перенос и концентрации для каждого компонента реагирующей смеси.

Предложенная математическая модель основана на следующих уравнениях [2, 4, 8]: неразрывности; сохранения количества движения; сохранения энергии; переноса химических компонентов смеси соответственно:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F};$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \vec{J}_q + S_h;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i.$$

Здесь ρ — массовая плотность; \vec{v} — вектор локальной скорости; S_m — источник, который определяет дополнительную массу, привносимую в поток; p — статическое давление; $\rho \vec{g}$ — сила тяжести; \vec{F} — внешние силы; $\bar{\tau}$ — тензор давления; E — внутренняя энергия; Y_i — массовые концентрации химического компонента i ; \vec{J}_q — плотность теплового потока смеси; \vec{J}_j — плотность диффузионного теплового потока j -го компонента; S_h — источник, который описывает тепловыделение в результате химических реакций; S_i — скорость образования i -го компонента из дисперсной фазы; \vec{J}_i — массовая диффузия i -го компонента; R_i — скорость образования i -го компонента в результате химической реакции.

Значительное влияние на достоверность разрабатываемой математической модели оказывает выбор гидродинамической модели турбулентности. Применена RNG-разновидность k - ε модели турбулентности, которая представляет собой совокупность дифференциальных уравнений переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε соответственно:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon. \end{aligned}$$

Здесь $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ — величины, обратные значениям эффективного числа Прандтля для k и ε соответственно; μ_{eff} — эффективная вязкость; G_k — генерация турбулентной кинетической энергии вследствие градиентов осредненных скоростей; G_b — генерация турбулентной кинетической энергии под действием сил плавучести для идеальных газов; Y_M — член, учитывающий влияние пульсационного расширения; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ — эмпирические константы; S_k, S_ε — дополнительные источники членов для k и ε соответственно.

Из-за сложности физико-химических процессов при построении математической модели были сделаны определенные допущения, которые упрощают процедуру численного решения:

- поток продуктов плазмохимической газификации является многокомпонентной, химически реагирующей смесью термодинамически идеальных газов;
- течение газа — трехмерное, турбулентное, стационарное и дозвуковое;
- объемной вязкостью, вязкостным нагревом, лучистым теплообменом и теплообменом через стенки газификатора пренебрегаем.

Для двухфазных вычислений в плазменном газификаторе выбрана модель дискретной фазы DPM (Discrete Phase Model), рассчитывающая траектории движения отдельных частиц [3, 9].

Модель прогнозирует траектории частиц дискретной фазы (угольных частиц) путем интегрирования уравнений их движения, записанных в форме Лагранжа (приводится только для направления x):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x,$$

где F_x — дополнительный член, учитывающий ускорение газового потока; $F_D(u - u_p)$ — сила сопротивления, приходящаяся на единицу массы частицы,

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}.$$

В приведенных выше выражениях u, u_p — скорости газовой фазы и частицы; μ — коэффициент молекулярной вязкости газовой фазы; ρ, ρ_p — плотности газовой фазы и частицы; d_p — текущий диаметр

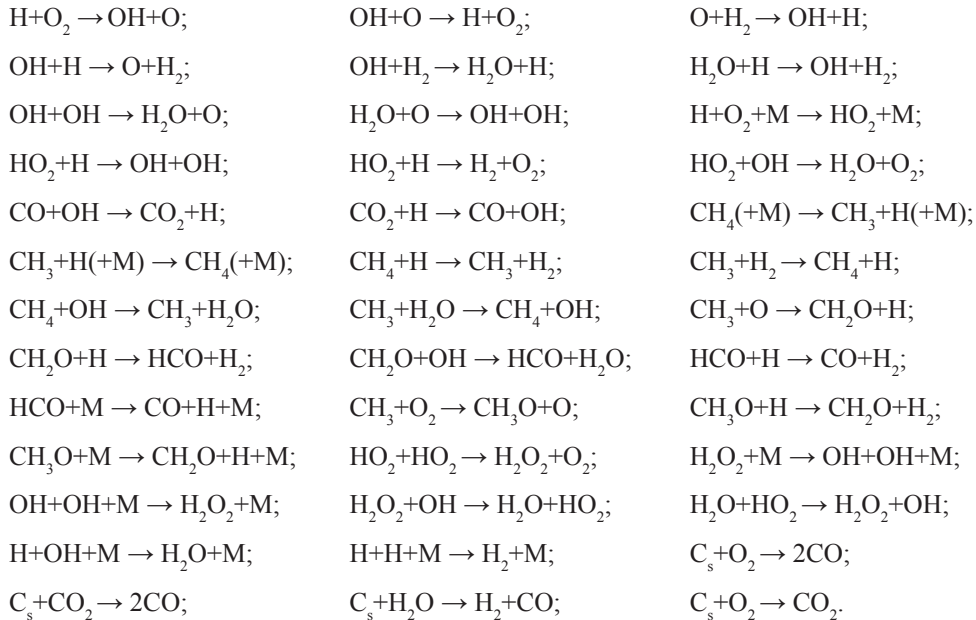
частицы; Re — относительное число Рейнольдса; C_D — коэффициент сопротивления частицы.

Для анализа закономерностей изменения экологических параметров в объеме ПТС газификации угля проведены расчеты ее характеристик.

В исследованиях использовался уголь с высшей теплотой сгорания $3,133 \cdot 10^7$ Дж/кг следующего состава

(по массе): $C=0,867347$; $H=0,053288$; $O=0,055556$; $N=0,018141$; $S=0,005669$. Зольность угля составляет 6,8% (по массе).

В соответствии с указанным составом угля рассчитана многоступенчатая кинетическая схема, включающая в себя тридцать девять химических реакций: тридцать пять газофазных и четыре поверхностного типа [10]:



На первой стадии исследований создана 3D-модель ПТС. Проведены исследования характеристик плазмохимической системы по схеме с двумя участками подачи угля и длиной реактора газификации 3150 мм (рис. 1).

Уголь вместе с транспортирующим агентом подается через восемь трубок, расположенных под углом 45° к оси ПТС, таким образом, в первой и второй ступенях газификации плазменно-топливного устройства обеспечивается первичная температурная подготовка топлива (частичная газификация с коэффициентом избытка окислителя 0,2). Через завихритель подается основная часть газифицирующего агента, которая обеспечивает в реакторе дожигания дальнейшее окисление угля и суммарное значение коэффициента избытка окислителя 0,4. В дальнейшем продукты газификации истекают в атмосферу. В каче-

стве газифицирующего агента используются воздух и кислород. Средний диаметр частиц угля — 75 мкм.

Используемые граничные условия для воздушной и кислородной газификации приведены в табл. 1 и 2.

На рис. 2–7 и в табл. 3 приведены результаты трехмерных расчетов характеристик ПТС.

Выход летучих фракций составляет 100% для обоих случаев. Кислородная газификация обеспечивает значительно большую степень конверсии угля по сравнению с воздушной (89,84% и 39,45% соответственно) и большее количество горючих компонентов в составе получаемого синтез-газа (для CO — 59,39% и 13,16%; для H_2 — 31,76% и 6,32% соответственно) вследствие отсутствия балластного азота в газифицирующем агенте, который дополнительно приводит к образованию нежелательных оксидов азота NO_x .

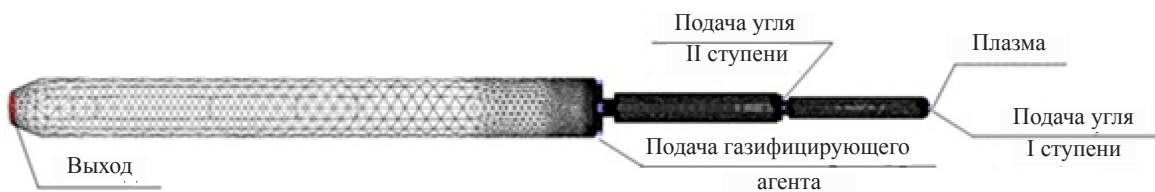


Рис. 1. Схема ПТС газификации угля

Таблиця 1. Граничные условия процессов воздушной плазменной газификации угля с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,4$

Процесс	Расход, кг/с	Температура, К
I ступень газификатора		
Подача угля	0,008	300
Подача воздуха	0,01856	300
II ступень газификатора		
Подача угля	0,008	300
Подача воздуха	0,01856	323
Завихритель		
Подача воздуха	0,03712	323
Плазма		
Подача воздуха	0,0015	4000

Таблиця 2. Граничные условия процессов кислородной плазменной газификации угля с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,4$

Процесс	Расход, кг/с	Температура, К
I ступень газификатора		
Подача угля	0,008	300
Подача кислорода	0,004394	300
II ступень газификатора		
Подача угля	0,008	300
Подача кислорода	0,004394	323
Завихритель		
Подача кислорода	0,008787	323
Плазма		
Подача кислорода	0,0015	4000

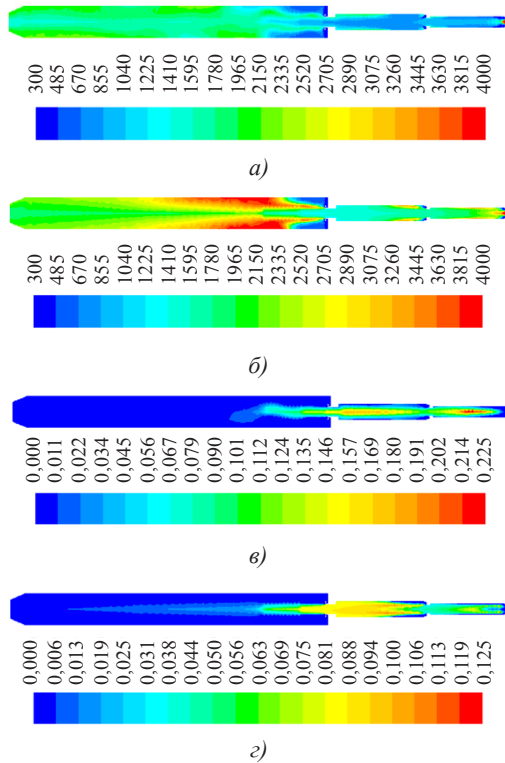
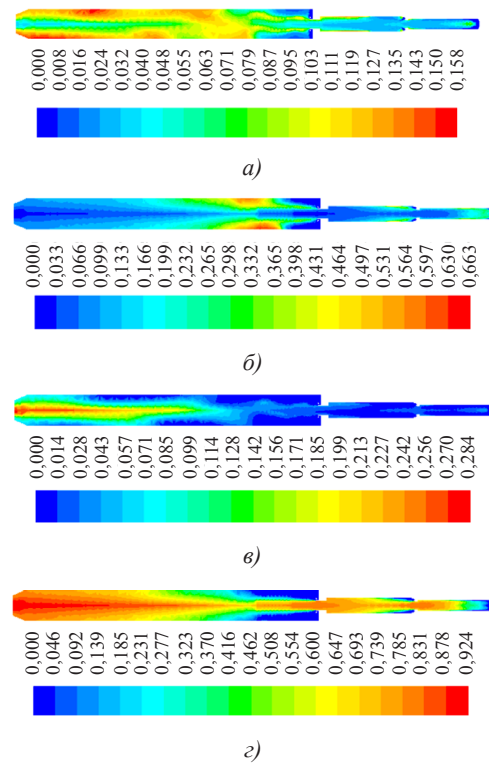


Рис. 2. Контуры температуры, К (а, б) и распределение массовых долей летучих фракций (в, г) в продольных сечениях ПТС при воздушной и кислородной газификации соответственно

Рис. 3. Распределение массовых долей CO₂ (а, б) и CO (в, г) в продольных сечениях ПТС при воздушной и кислородной газификации соответственно

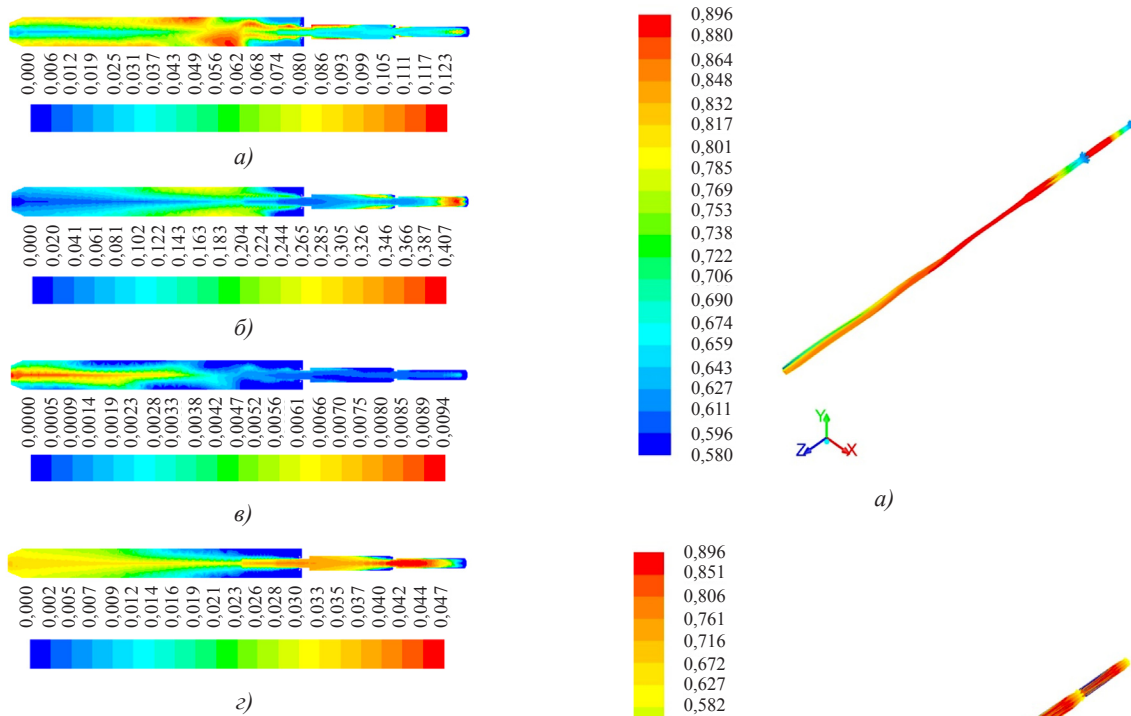


Рис. 4. Распределение массовых долей H_2O (а, б) и H_2 (в, г) в продольных сечениях ПТС при воздушной и кислородной газификации соответственно

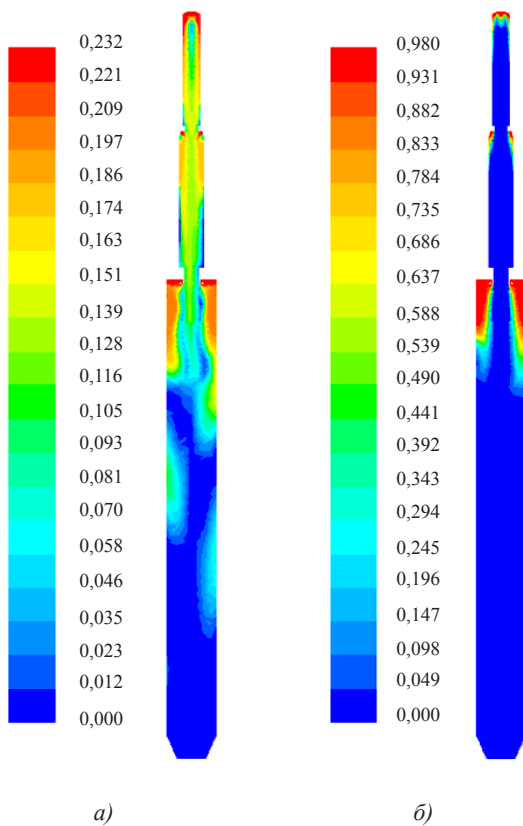


Рис. 5. Распределение массовых долей O_2 в продольных сечениях ПТС при воздушной (а) и кислородной (б) газификации

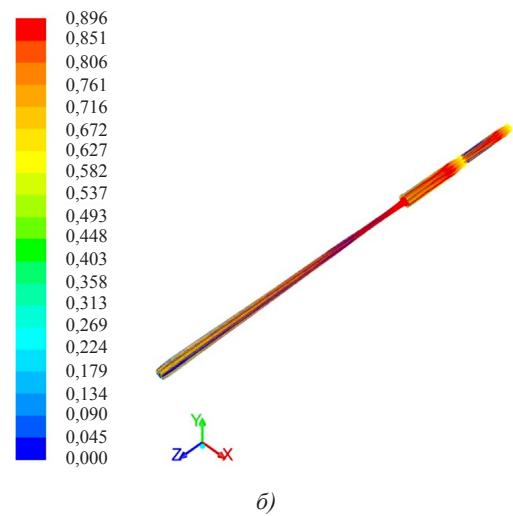


Рис. 6. Конверсия угля, %, в ПТС при воздушной (а) и кислородной (б) газификации

Таблица 3. Интегральные расчетные характеристики ПТС в выходном сечении при плазменной газификации угля

Характеристика	Воздушная газификация	Кислородная газификация
Коэффициент избытка окислителя α	0,4	0,4
Температура, К	1881,4	2030,1
Скорость потока, м/с	49,6	27,8
Мольная доля, %		
летучих	0,12	0,33
O_2	0	0
CO_2	6,03	2,66
H_2O	9,44	4,88
CO	13,16	59,39
H_2	6,32	31,76
Выход летучих, %	100	100
Конверсия угля, %	39,45	89,84

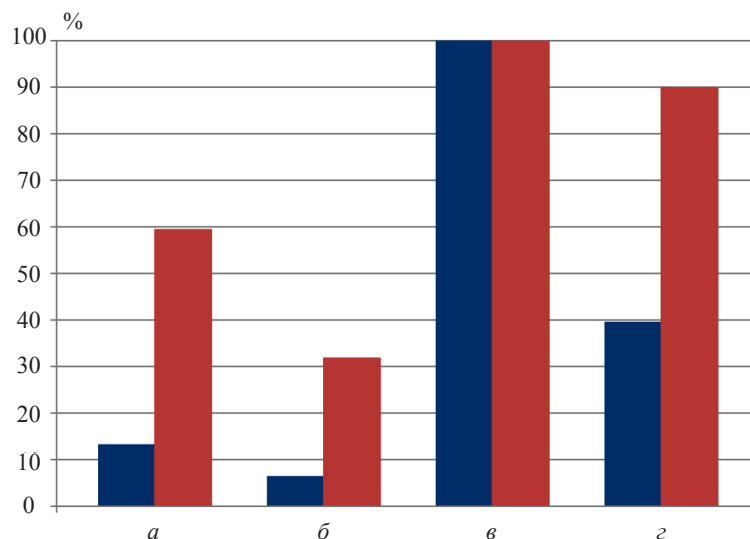


Рис. 7. Интегральные характеристики ПТС в выходном сечении при воздушной и кислородной газификации соответственно: а — мольная доля CO; б — мольная доля H₂; в — выход летучих; г — конверсия угля

ВЫВОДЫ

1. Выполненные расчеты свидетельствуют о возможности применения схемы двухступенчатого плазменного газификатора для частичного окисления низкосортных углей с целью получения синтетического газа, который в дальнейшем может быть использован в качестве топлива, например, для камер сгорания газотурбинных двигателей.

2. Примененный комплекс вычислительной гидродинамики позволяет определить основные параметры плазменно-топливной системы для создания эффективной конструкции плазменно-угольной горелки.

3. Сравнение основных параметров плазменно-топливной системы при использовании газифицирующих агентов различных составов показало, что воздух не является эффективным окислителем низкосортного угля, так как в результате имеет место неполная конверсия угля и отсутствие в больших количествах горючих компонентов (CO и H₂) в продуктах газификации. Применение в качестве окислителя кислорода позволяет резко интенсифицировать процессы термических превращений низкосортного угля и получить высокорреакционные продукты для последующей подачи в камеру сгорания газотурбинного двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Альтшулер, В.С.** Новые процессы газификации твердого топлива [Текст] / В.С. Альтшулер. — М. : Недра, 1976. — 280 с.
- [2] **Патанкар, С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С.В. Патанкар ; пер. с англ. под ред. В.Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
- [3] **Сербин, С.И.** Особенности рабочего процесса трехступенчатой системы плазменной газификации угля [Текст] / С.И. Сербин, Н.А. Гончарова // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матер. Міжнар. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 226–229.
- [4] **Batchelor, G.K.** An Introduction to Fluid Dynamics [Text] / G.K. Batchelor. — Cambridge : Univ. Press, 1967. — 615 p.
- [5] **Cadorin, M.** Analysys of a micro gas turbine fed by natural gas and synthesis gas: test bench and combustor CFD analysis [Text] / M. Cadorin, M. Pinelli, A. Vaccari // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. — Vancouver, British Columbia, Canada, 2011.
- [6] **Karpenko, E.I.** Plasma-Fuel Systems for Enhancement Coal Gasification and Combustion [Text] / E. I. Karpenko, V. E. Messerle, A. B. Ustimenko // Presentations Abstracts of 30th International Symposium on Combustion. — University of Illinois at Chicago, 2004. — 110 p.
- [7] **Matveev, I.B.** Modeling of the Coal Gasification Processes in a Hybrid Plasma Torch [Text] / I.B. Matveev, S. I. Serbin // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2007. — Vol. 35, nr 6. — P. 1639–1647.

- [8] **Serbin, S. I.** Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / S. I. Serbin, A. Mostipanenko, I. Matveev // Proc. of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. — Honolulu, Hawaii, USA, 2011. — 6 p.
- [9] **Serbin, S. I.** Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System [Text] / S. I. Serbin, I. Matveev // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2010. — Vol. 38, nr. 12. — P. 3300–3305.
- [10] **Smooke, M. D.** Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames [Text] // Lecture Notes in Physics / M. D. Smooke. — Springer-Verlag, 1991. — Vol. 384. — P. 161.

© С. І. Сербін, Н. О. Гончарова

Надійшла до редколегії 03.08.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. Ф. Романовський*

Статтю розміщено у Віснику НУК №2, 2012