

УДК 622.61,537.533

В. Е. Костюк^{*}, канд. техн. наук

П. М. Канило^{**}, д-р техн. наук

В. В. Соловей^{**}, д-р техн. наук

К. В. Костенко^{**}

* Национальный аэрокосмический университет «ХАИ»
(г. Харьков, E-mail: aedlab@ic.kharkov.ua)

** Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, E-mail: pmk@ipmach.kharkov.ua)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НИЗКОСОРТНОГО УГЛЯ

Рассмотрена проблема стабилизации горения низкорекреационных углей без использования природного газа или мазута. Проведена оценка с помощью методов вычислительной аэрогидродинамики эффективности термохимической подготовки высокосольного угля при его нагреве продуктами сгорания природного газа и водорода в обогащенном кислородом воздухе. Приведены результаты расчетов многоступенчатой пылеугольной горелки с закруткой воздуха и с различными вариантами запитки реактора термохимической подготовки реагентами. Показана эффективность замещения природного газа водородом и кислородом при сжигании высокосольных углей в котлах энергоустановок.

Розглянуто проблему стабілізації горіння низькорекреційного вугілля без використання природного газу або мазуту. Проведено оцінку за допомогою методів обчислювальної аерогідродинаміки ефективності термохімічної підготовки високозольного вугілля при його нагріванні продуктами згорання природного газу та водню в збагаченому киснем повітрі. Наведено результати розрахунків багатоступінчастого пилоугольного пальника із закрученням повітря та з різними варіантами живлення реактора термохімічної підготовки реагентами. Показано ефективність заміщення природного газу воднем і киснем при спалюванні високозольного вугілля у котлах енергоустановок.

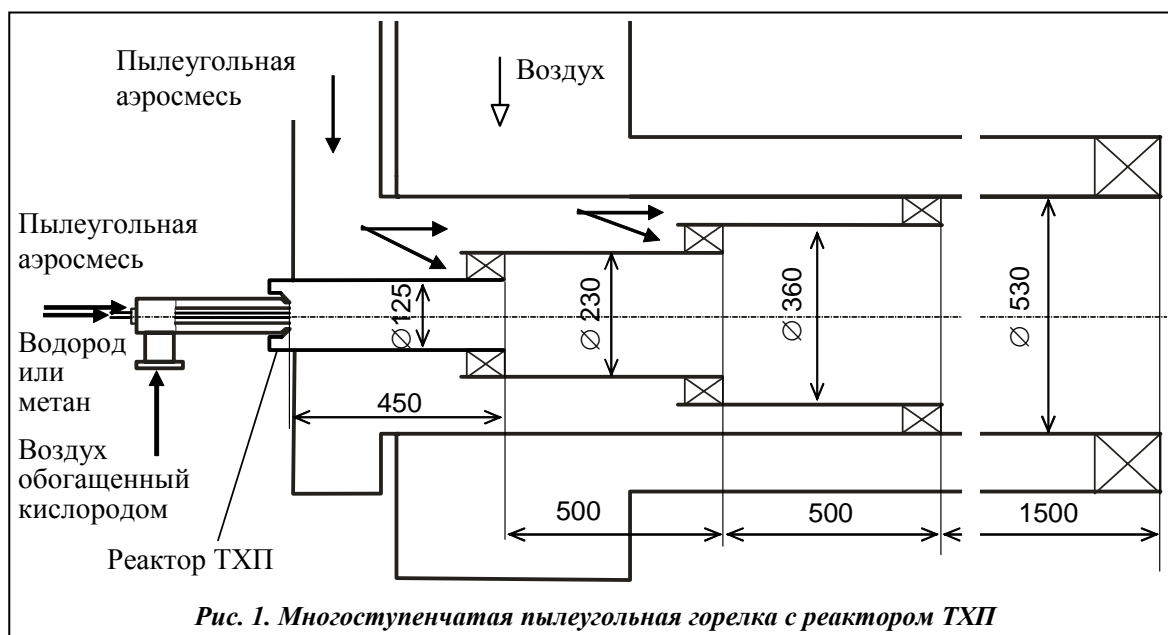
Введение

Сокращение использования природного газа и мазута в качестве вспомогательных топлив на угольных электростанциях – политико-экономический императив Украины. Поэтому актуальна задача поиска технических решений, которые позволят решать проблему стабилизации горения пылеугольного топлива высокой зольности. Данная проблема может быть решена применением технологии «кипящего слоя» [1], но это требует значительных инвестиций в реконструкцию оборудования электростанций. Одним из перспективных путей решения проблемы сжигания угольной пыли с низким содержанием летучих является применение плазмотермической подготовки пылевидного топлива перед сжиганием [2].

Целью настоящего исследования является оценка с помощью методов вычислительной аэрогидродинамики эффективности водородно-кислородной термохимической подготовки (ТХП) высокосольного угля в многоступенчатой пылеугольной горелке.

Постановка задачи и метод решения

Первая ступень многоступенчатой пылеугольной горелки (рис. 1) представляла собой реактор ТХП, выполненный в виде круглой трубы с внезапным расширением. Через трубу продувалась полидисперсная пылеугольная аэросмесь донецкого антрацита марки АШ с воздухом, содержащим дополнительное количество кислорода (предполагалось, что кислород предварительно смешан с воздухом на молекулярном уровне). В центре входного отверстия установлен капилляр диаметром 8 мм, через который внутрь реактора вводился



водород или метан. Последующие ступени горелки представляли собой надетые друг на друга коаксиальные трубы нарастающего диаметра, в зазоры между которыми вставлены кольцевые лопаточные завихрители. Через завихрители продувалась полидисперсная пылеугольная аэрозоль донецкого антрацита марки АШ с воздухом, не содержащим дополнительного количества кислорода.

При математическом описании физико-химических процессов в многоступенчатой горелке с реактором ТХП принимались следующие основные допущения: течение несущей газовой среды квазистационарное, турбулентное, несжимаемое, многокомпонентное, химически реагирующее; скорость газозольных химических реакций бесконечно велика; газовая смесь состоит из шести химических компонентов (летучие, H_2 (или CH_4), O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O); угольные частицы сферические, полидисперсные, их горение включает процессы выхода и воспламенения летучих и выгорания коксового остатка; горение кокса, летучих, водорода и метана описывается одноступенчатыми необратимыми химическими реакциями полного окисления; плавучестью, объемной вязкостью, вязким нагревом, лучистым теплообменом, объемом, занимаемым частицами; их турбулентным рассеиванием и влиянием на параметры турбулентности пренебрегали.

Пылеугольная аэрозоль моделировалась как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжеевым описанием движения угольных частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывалось на основе модели «частица – источник в ячейке» [3], в соответствии с которой присутствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы. Взаимодействие газозольных химических процессов и турбулентности описывалось с помощью модели разрушения турбулентных вихрей Магнуссена–Хертагера [4].

При сделанных выше допущениях поведение газовой фазы описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), состоящей из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, двух уравнений дифференциальной модели турбулентности k - ε типа [5], уравнения сохранения энергии и уравнений массовой доли химических компонентов вида

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_n, \quad j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = S_{fi}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_\tau}{Pr_\tau} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_q, \quad j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho(G - \varepsilon) = 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \rho(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} = 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u_j Y_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_\tau}{Sc_\tau} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = R_i + S_i, \quad j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

где u_j – декартовы компоненты вектора осредненной скорости газа; x_j – декартовы координаты; S_n – источник массы, соответствующий переносу массы в газовую фазу от реагирующих

частиц; ρ – плотность газа; p – давление газа; $\tau_{ij} = (\mu + \mu_m) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – компоненты тензора

напряжений; μ – динамическая вязкость; μ_τ – турбулентная вязкость, определяемая по

формуле Колмогорова–Прандтля [6]; $k = \frac{1}{2} u'_i u'_i$ и $\varepsilon = \frac{1}{2} \nu \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2$ – соответственно кинетическая энергия турбулентности и удельная скорость ее диссипации; u'_i – возмущения скорости

газа относительно осредненного значения; ν – кинематическая вязкость; S_{fj} – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием;

$h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right)$ – удельная энтальпия; Y_i – массовая доля химического компонента i ; Δh_{fi}^0 – удельная энтальпия образования химического компонента i ; T и T^0 – температура

газа и стандартная температура соответственно; c_{pi} – удельная теплоемкость химического компонента i при постоянном давлении; Pr – число Прандтля; Pr_τ – турбулентное число Прандтля; Sc – число Шмидта; Sc_τ – турбулентное число Шмидта; S_q – источник теплоты,

обусловленный межфазным взаимодействием с частицами; $G = \mu_\tau \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – член, ха-

рактеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений; σ_k , σ_ε , σ_τ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_g и C_d – эмпирические коэффициенты; S_i – источник массовой доли химического компонента i , обусловленный межфазным взаимодействием с частицами;

$R_i = \sum_k R_{ik}$ – массовая скорость образования (расходования) химического компонента i ; R_{ik} –

массовая скорость образования (расходования) компонента i в реакции k , определявшаяся по модели Магнуссена–Хертагера [4] как меньшая (т. е. лимитирующая) величина, получаемая из двух выражений

$$R_{ik} = v'_{ik} M_i A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_p}{v'_{pk} M_p} \right), \quad R_{ik} = v'_{ik} M_i B \rho \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{\sum_n Y_n}{\sum_j^N v''_{jk} M_j},$$

где Y_p – массовая доля конкретного реагента; $v'_{p,k}$ – стехиометрический коэффициент конкретного реагента в реакции k ; M_p – молекулярная масса конкретного реагента; Y_n – массовая доля продукта реакции; $v'_{i,k}$ – стехиометрический коэффициент реагента i в реакции k ; M_i – молекулярная масса химического компонента i ; $v''_{j,k}$ – стехиометрический коэффициент продукта j в реакции k ; N – количество продуктов в реакции k ; M_j – молекулярная масса продукта j ; A, B – эмпирические коэффициенты.

Система ДУЧП (1)–(6) является незамкнутой. Необходимая для ее замыкания связь между термодинамическими переменными p, T и ρ устанавливается уравнением состояния смеси идеальных газов

$$p = R\rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i},$$

где R – универсальная газовая постоянная; M_i – молекулярная масса химического компонента i .

Для определения источников членов S_n, S_{fi}, S_q, S_i в уравнениях (1)–(3), (6) использовалась модель межфазного взаимодействия, реализуемая поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

Весь диапазон начальных размеров угольных частиц делился на конечное число дискретных интервалов; каждый из них представлялся средним диаметром, для которого выполнялся расчет траектории и тепломассообмена. При этом каждая моделируемая частица представляла собой «пакет» частиц с одинаковыми траекториями. Распределение частиц по размерам описывалось формулой Розина–Раммлера

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n},$$

где Y_d – массовая доля частиц с диаметром, большим d ; \bar{d} – медианный диаметр частиц; n – параметр распределения.

Траектории частиц моделировались путем интегрирования уравнения баланса сил, действующих на частицу, которое уравнивает инерцию частицы с силой аэродинамического сопротивления

$$\frac{du_{pj}}{dt} = -\frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \sqrt{\sum_j (u_{pj} - u_j)^2}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где u_{pj} и u_j – соответственно декартовы компоненты вектора скорости частицы и газа; t – время; ρ – плотность газа; C_R, Re_p, ρ_p, d_p – коэффициент аэродинамического сопротивления, относительное число Рейнольдса, плотность и диаметр частицы соответственно. Для вычисления C_R использовалась эмпирическая зависимость $C_R(Re_p)$ для одиночной сферы.

Тепломассообмен угольных частиц описывался тремя моделями: теплообмена инертной частицы; выхода летучих и моделью выгорания коксового остатка.

Модель теплообмена инертной частицы применялась до тех пор, пока температура частицы T_p не превышала температуру выхода летучих T_v . При этом температура частицы полагалась постоянной по объему и изменялась в соответствии с балансом тепла, определяемым уравнением

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p), \quad (8)$$

где m_p, S_p, c_p, T_p – соответственно масса, площадь поверхности, удельная теплоемкость и температура частицы; t – время; α – коэффициент теплоотдачи; T_∞ – локальная температура газа.

Модель выхода летучих использовалась, когда температура угольной частицы достигала температуры начала выхода летучих T_v и оставалась в силе до тех пор, пока масса частицы m_p превышала начальную массу нелетучих компонентов в частице

$$T_p \geq T_v \text{ и } m_p > (1 - f_{v,0}) \cdot m_{p,0},$$

где $f_{v,0}$ – массовая доля летучих, изначально присутствующих в частице.

Тепломассообмен частицы во время выхода летучих описывался системой уравнений

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_v, \quad (9)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -f_{v,0} m_{p,0} k, \quad (10)$$

где h_v – удельная теплота образования летучих; $m_{p,0}$ – начальная масса частицы; $k = A_1 e^{-(E/RT_p)}$ – кинетическая скорость, определяемая уравнением Аррениуса (A_1 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации). Данная модель предполагает, что скорость выхода летучих в первую очередь зависит от их количества, оставшихся в частице [7].

Модель выгорания коксового остатка применялась по окончании выхода летучих и до тех пор, пока не выгорит весь коксовый остаток

$$(1 - f_{v,0} - f_k) m_{p,0} < m_p < (1 - f_{v,0}) m_{p,0},$$

где f_k – массовая доля кокса, изначально присутствующего в частице. Тепломассообмен частицы при выгорании коксового остатка описывался системой уравнений

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_u; \quad (11)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -S_p p_{O_2} \frac{D_0 R}{D_0 + R}, \quad (12)$$

где S_p – площадь поверхности частицы; H_u – удельная теплота сгорания кокса; p_{O_2} – парциальное давление кислорода в газе; $D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0,75}}{d_p}$ и $R = C_2 e^{-(E/RT_p)}$ – коэффициенты

диффузионной и кинетической скоростей поверхностной реакции соответственно; d_p – диаметр частицы; f_h , C_1 и C_2 – эмпирические коэффициенты.

После того как весь коксовый остаток выгорит, частица состоит из зольного остатка, и для нее справедлива модель теплообмена инертной частицы – уравнение (8).

Полнота сгорания угля вычислялась по формуле

$$\eta_\Sigma = \frac{\eta_v V + \eta_k (100 - V)}{100},$$

где η_v и η_k – соответственно полнота сгорания летучих и кокса, %; V – исходное содержание летучих в угле, %.

Дискретизация исходных ДУЧП (1)–(6) осуществлялась методом контрольных объемов с применением алгоритма SIMPLE [8] и схемы первого порядка точности для аппроксимации конвективных членов. Решение получающихся в результате систем линейных алгебраических уравнений выполнялось методом Гаусса–Зейделя, интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (7)–(12) – методом Рунге–Кутты.

Решение отыскивалось в осесимметричной расчетной области, соответствующей проточной части многоступенчатой горелки с реактором ТХП. Расчетная область покрывалась неравномерной прямоугольной сеткой, включавшей 28 тыс. контрольных ячеек. Применялись следующие граничные условия непрерывной фазы: на входных границах – значения независимых переменных; на стенках – условия прилипания; на выходной границе – «мягкие» граничные условия. Для описания турбулентного пограничного слоя использовались функции стенки. Для каждого «пакета» частиц задавались начальные условия: положение частицы (координаты x_j), ее скорость (компоненты u_{pj}), диаметр, температура и масса.

вый расход частиц, следующих вдоль траектории. Полагалось, что при столкновении со стенкой частица упруго отражается от нее.

Результаты расчетов

Были выполнены расчеты четырех вариантов питания горелок, отличавшихся реагентами, подаваемыми в первую ступень (реактор ТХП), и соотношением расходов воздуха через три последние ступени горелки. Лопатки завихрителей полагались установленными под углом 45°. Для всех вариантов коэффициент избытка воздуха в первой ступени горелки (реакторе ТХП) $\alpha_1 = 0,2$, расход кислорода $G_{O_2,1} = 0,488$ г/с; в остальных ступенях горелки $\alpha_i = 0,7$, $G_{O_2,i} = 0$. Начальная температура всех реагентов полагалась равной 500 К. Начальная скорость частиц угля принималась равной местной скорости воздуха на входе в реактор. Задавались следующие теплотехнические характеристики и дисперсный состав исходной угольной пыли:

плотность	1550 кг/м ³ ;
теплоемкость	1680 Дж/кг·К;
теплопроводность	0,0454 Вт/м·К;
низшая теплота сгорания (рабочая)	18000 кДж/кг;
низшая теплота сгорания (горючая)	32386 кДж/кг;
доля горючих компонентов	50,66%;
доля летучих компонентов	7,8%;
температура начала выхода летучих	700 К;
скрытая теплота образования летучих	11000 кДж/кг;
стехиометрический коэффициент продуктов газификации кокса	2,67;
минимальный начальный диаметр частиц угля	10 мкм;
максимальный начальный диаметр частиц угля	250 мкм;
медианный начальный диаметр частиц угля	57 мкм;
показатель степени в формуле Розина-Раммлера	1,1.

Ниже приведены исходные данные численного моделирования горелки с реактором ТХП: элементарный состав угля (табл. 1) и расходы реагентов по ступеням горелки (табл. 2).

Результаты численных расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 2 – 5. В табл. 3 приведены осредненные параметры в выходном сечении горелки для четырех вариантов ее топливопитания. На рис. 2 показано изменение средней по сечениям температуры газа по длине горелки для варианта № 1, на рис. 3–5 – структура течения в ней. Характер течения для других вариантов топливопитания аналогичен.

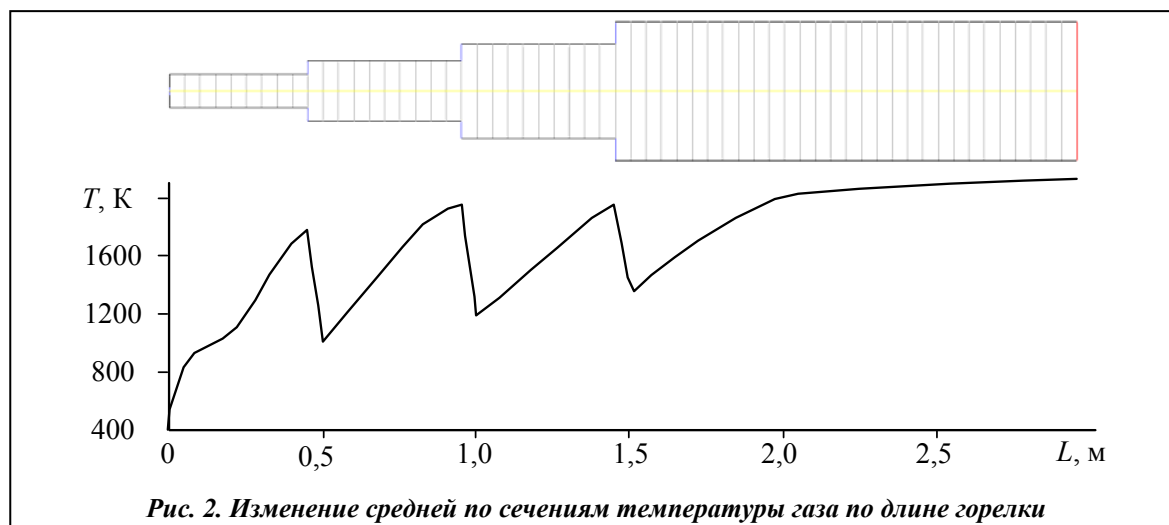


Рис. 2. Изменение средней по сечениям температуры газа по длине горелки

Таблица 1. Элементарный состав угля

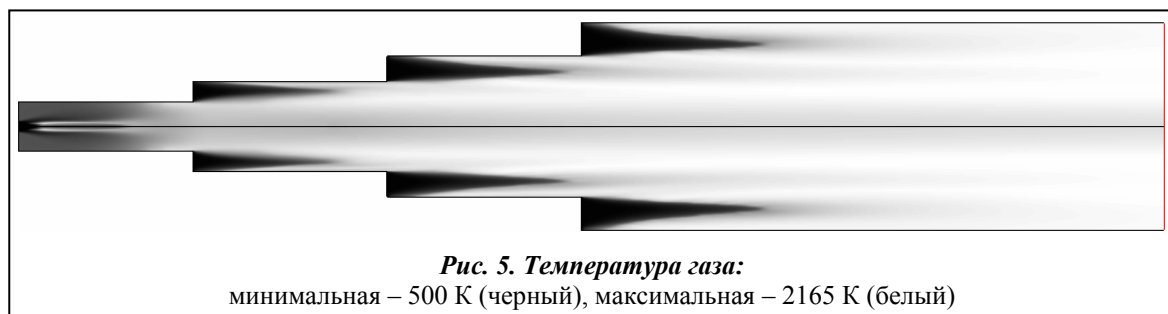
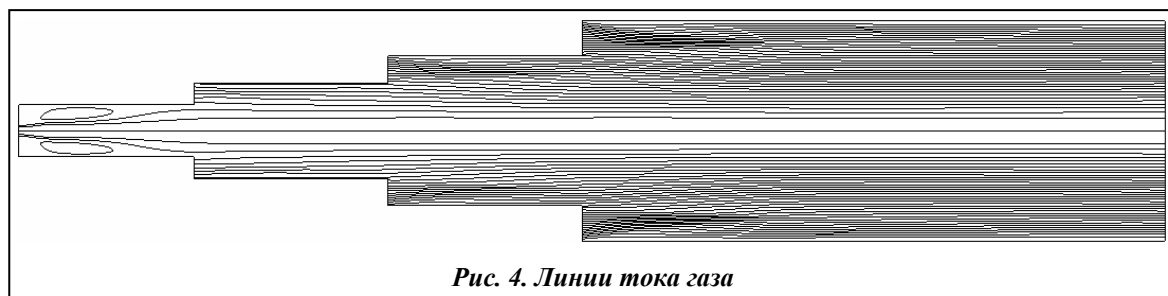
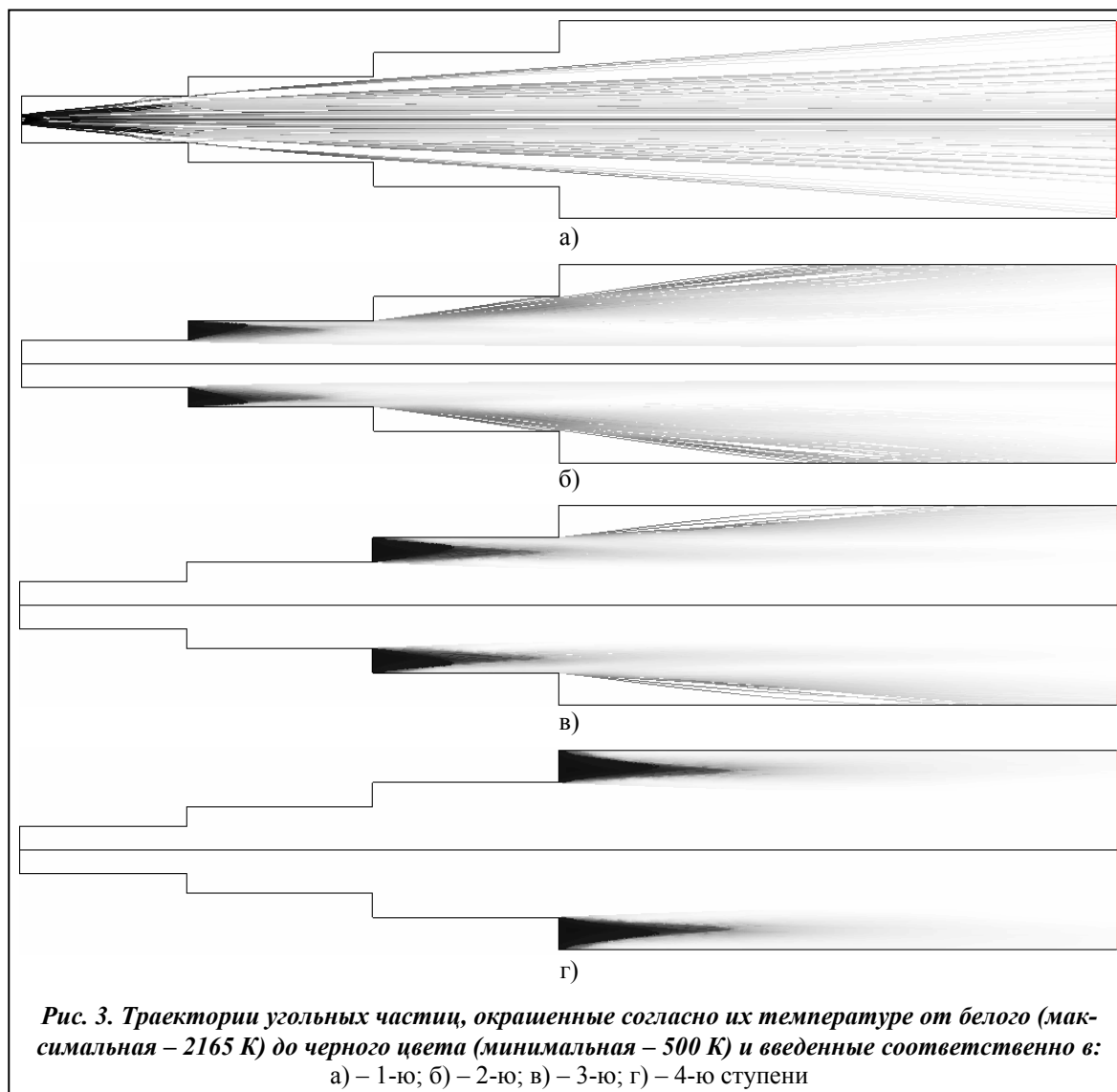
Заданная масса угля	Элементы							
	С	Н	S	O	N	W (влага)	A (зола)	V (летучие)
рабочая, %	49,06	1,55	1,5	2,88	0,55	3,09	41,3	7,8
сухая, %	50,66	–	–	–	–	–	–	–
горючая, %	88,33	2,79	2,7	5,19	0,99	–	–	–

Таблица 2. Расходы реагентов по ступеням горелки

Параметры	Вариант топливопитания			
	1	2	3	4
Реагенты, подаваемые в ступень № 1	АШ+Н ₂ +О ₂	АШ+Н ₂ +О ₂	АШ+СН ₄	АШ+СН ₄
Соотношение расходов воздуха через ступени № 2, № 3, № 4	1:2:3	1:2:4	1:2:3	1:2:4
Расход реагентов по ступеням, кг/с:				
ступень № 1				
$G_{B,1}$	8,000	8,000	8,000	8,000
$G_{AШ,1}$	6,635	6,635	6,215	6,215
$G_{H_2,1}$	0,061	0,061	–	–
$G_{O_2,1}$	0,488	0,488	–	–
$G_{CH_4,1}$	–	–	0,142	0,142
ступень № 2				
$G_{B,2}$	22,923	19,648	22,923	19,648
$G_{AШ,2}$	4,461	3,824	4,531	3,883
ступень № 3				
$G_{B,3}$	45,845	39,296	45,845	39,296
$G_{AШ,3}$	8,922	7,647	9,062	7,767
ступень № 4				
$G_{B,4}$	68,768	78,591	68,768	78,591
$G_{AШ,4}$	13,383	15,294	13,593	15,535

Таблица 3. Результаты расчета процессов в многоступенчатой горелке

Параметры на выходе горелки	Вариант топливопитания			
	1	2	3	4
скорость газа, м/с	4,71	4,56	4,63	4,48
среднее время пребывания угольных частиц, с	0,952	0,937	0,957	0,943
влажность угля, %	0,687	0,683	0,644	0,642
полнота сгорания летучих, %	100	100	100	100
полнота сгорания кокса, %	35,13	35,00	34,96	34,92
полнота сгорания угля, %	40,19	40,07	40,03	40,00
температура газа, К	2130	2123	2114	2109
массовая доля О ₂	0,009	0,010	0,008	0,009
массовая доля СО ₂	0,091	0,144	0,147	0,147
массовая доля Н ₂ О	0,126	0,126	0,121	0,121
массовая доля Н ₂	$3,3 \cdot 10^{-15}$	$1,9 \cdot 10^{-15}$	–	–
массовая доля СН ₄	–	–	$9,0 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-12}$



Выводы

1. Расчеты подтвердили возможность водородно-кислородной термохимической подготовки низкосортного угля.

2. Структура течения в многоступенчатой горелке характеризуется наличием тороидальной зоны обратных токов за внезапным расширением поперечного сечения 1-й ступени, которая отклоняет траектории угольных частиц к периферии. В слое смешения струи H_2 , поступающей из капилляра, происходит его сжигание с образованием продуктов сгорания, часть которых вовлекается в зону обратных токов и обеспечивает стабилизацию пламени.

3. Угольные частицы, отклоняясь к периферии вследствие закрутки и рикошетируя от стенок, пролетают через высокотемпературные области, где подсушиваются и нагреваются до температуры начала выхода летучих. По окончании выхода летучих газифицируются и выгорают кокс, после чего частицы выносятся газовым потоком из горелки.

4. Средняя температура газа на выходе из горелки с подачей в ступень № 1 водорода и кислорода составляет 2130 и 2123 К при соотношении расходов воздуха по трем последним ступеням горелки 1:2:3 и 1:2:4 соответственно, с подачей в ступень № 1 метана – 2114 и 2109 К при соотношении расходов воздуха по трем последним ступеням горелки 1:2:3 и 1:2:4 соответственно.

5. Высокая температура продуктов сгорания наряду со значительным недожогом кокса на выходе из горелки обеспечивает высокую реакционную способность смеси.

6. Направления дальнейших исследований авторы видят в верификации математической модели по экспериментальным данным и оптимизации конструкции горелки с реактором ТХП.

Литература

1. *Мацевитый Ю. М.* Инновационные технологии модернизации энергоблоков ТЭС – эффективный путь обеспечения устойчивого функционирования энергетического комплекса Украины / Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Шульженко, В. Н. Голощапов [и др.] // Пробл. машиностроения. – 2007. **10**, № 4. – С. 9–15.
2. *Мацевитый Ю. М.* Применение водородных технологий для повышения энергоэффективности энергоблоков ТЭС в условиях дефицита природного газа / Ю. М. Мацевитый, В. В. Соловей, П. М. Канило // Вестн. Инж. академии Украины. – 2007. – № 2. – С. 148–152.
3. *Кроу Д.* Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц // Теорет. основы инж. расчетов. – 1982. – № 32. – С. 114–122.
4. *Magnussen B. F.* On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // Proc. 16th Int. Symp. on Combustion. – 1976. – P. 747–775.
5. *Launder B. E.* Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 310 p.
6. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
7. *Badzioch S.* Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles / S. Badzioch, P. G. W. Hawksley // Ind. Eng. Chem. Process Design and Development. – 1970. – № 9. – P. 521–530.
8. *Vandoormaal J. P.* Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows / J. P. Vandoormaal, G. D. Raithby // Numer. Heat Transfer. – 1984. – № 7. – P. 147–163.

Поступила в редакцию
13.12.09