

УДК 662.612

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОДИСПЕРСНОМ ПОТОКЕ

В. И. ТИМОШЕНКО

Институт технической механики НАН Украины и Государственного космического агентства Украины,

49600, Днепропетровск, ул. Лешко-Попеля, 15  
e-mail: timoshenko@itm3.dp.ua

Получено 11.02.2015

Анализируются особенности прогрева, воспламенения и сгорания сухих и влагонасыщенных частиц угля в потоке горячего воздуха. Используются модель двухскоростной двухтемпературной сплошной среды, кинетические модели гетерогенных реакций на поверхности частиц и равновесные модели реакций в газовой фазе. Проведены расчеты для изотермических частиц и с учетом изменения температуры в пределах частицы. Показано, что учет изменения температуры внутри частицы может приводить к уменьшению (в два и более раз) расстояния от входного сечения времени прогрева и воспламенения влагонасыщенной частицы по сравнению с изотермической частицей. При увеличении начальной температуры воздуха степень влияния изменения температуры внутри частиц уменьшается.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** модель двухскоростной двухтемпературной сплошной среды, сухие и влагонасыщенные частицы угля, гетерогенные реакции

Аналізуються особливості прогріву, запалення і згорання сухих і волого насичених часток вугілля в потоці гарячого повітря. Використовуються модель двохшвидкісного двохтемпературного суцільного середовища, кінетичні моделі гетерогенних реакцій на поверхні частинок і рівноважних реакцій у газовій фазі. Проведено розрахунки для ізотермічних частинок і з урахуванням зміни температури в межах частинки. Показано, що урахування зміни температури усередині частки може приводити до зменшення (у два і більш рази) відстані прогріву і запалення волого насичених частинок в порівнянні з ізотермічною частинкою. При збільшенні початкової температури повітря ступінь впливу зміни температури усередині часток зменшується.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** модель двохшвидкісного двохтемпературного суцільного середовища, сухі і волого насичені частки вугілля, гетерогенні реакції

The characteristics of warm-up, ignition and combustion of dry and wet coal particles in the hot air flow are discussed. The two speed and two temperature continuous medium model, the kinetic model heterogeneous reactions on the particles surface and the equilibrium model reactions in the gas phase are used. Calculations were performed for isothermal particles and taking into account temperature changes within the particles. It is shown that the changes in the temperature of the inside of the particles may lead to a decrease (two and more times) the distance from the input section of warm-up and ignition of wet particles in compared with the isothermal particle. When increasing the initial air temperature influence temperature changes inside of the particles decreases.

**KEY WORDS:** the two speed and two temperature continuous medium model, dry and wet coal particles, heterogeneous reactions

### ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается течение газодисперсной струи, которая является смесью продуктов сгорания угольных частиц в воздухе. Несущая фаза представляет собой струю химически равновесной смеси, состоящей из семи компонентов  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ . В качестве дисперсной фазы рассматривается угольная пыль. Практически во всех посвященных изучению газодисперсных течений работах принимается, что размеры частиц настолько малы, что можно пренебречь изменением температуры в пределах частицы при их нагреве горячим газовым потоком – изотермическая частица [1, 2]. Однако характер прогрева определяется не только размерами частиц, но и теплофизическими свойствами материала частиц. В частнос-

ти, при большом коэффициенте теплоотдачи и малой теплопроводности материала частиц модель “изотермическая частица” может привести к погрешности в определении времени прогрева и воспламенения частицы. Это обстоятельство отмечается в [3, 4] Процессы, связанные массопереносом и фазовыми переходами в объеме частицы при ее нагреве, также могут заметно изменить характер прогрева и воспламенения частиц. Одним из таких процессов является испарение влаги из материала водонасыщенных частиц [5, 6]. Особенностью воспламенения и горения влагонасыщенных частиц оказывается параллельное прохождение процессов прогрева частиц, испарения воды внутри частицы, горения углерода на ее поверхности В [7, 8] приведены основные положения математической модели и количественные данные, характеризую-

щие особенности влияния внутри объемного распределения температуры на параметры прогрева и воспламенения влагонасыщенных угольных частиц в реакционном пространстве, заполненном горячим воздухом. В настоящей статье обсуждаются расчетная модель и общие особенности нагрева и воспламенения частиц и влияние неравномерности их прогрева на сгорание в несущем потоке горячего воздуха. При решении задачи определения параметров частиц при течении газодисперсной струи в спутном низкоскоростном изобарическом потоке горячего воздуха используется двухскоростная и двухтемпературная модель сплошной среды.

## 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ

Система уравнений для несущей (газовой) и дисперсной фаз (частицы угля), описывающих осесимметричное течение в изобарической газодисперсной струе, в цилиндрических координатах  $x, y$  (ось  $x$  направлена вдоль оси струи, ось  $y$  – перпендикулярно ей) при значении турбулентного числа Льюиса  $Le_t = 1$  имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\rho v}{y} = \dot{m}_p, \\ & \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\dot{m}_p(u - u_p) - \\ & - f_q \cdot (u - u_p) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left( y \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (1) \\ & \rho u \frac{\partial H_0}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H_0}{\partial y} = -f_T \alpha (T - T_p) + \\ & + m_p \left( h_m(T_p) - h(T) + \frac{1}{2} (V_p^2 - V^2) \right) + \\ & + (\bar{V}_p - \bar{V}) \cdot \bar{F}_p + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[ y \left( \frac{\mu}{Pr} \right)_{eff} \frac{\partial H}{\partial y} \right] - \\ & - (\bar{V}_p - \bar{V}) \cdot \bar{F}_p + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \left[ \left( \frac{1}{Pr} - 1 \right) \mu \right]_{eff} u \frac{\partial u}{\partial y} \right\}, \\ & \rho u \frac{\partial X_i^e}{\partial x} + \rho v \frac{\partial X_i^e}{\partial y} = \dot{m}_i^e - X_i^e \dot{m}_p + \\ & + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[ y \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff} \frac{\partial X_i^e}{\partial y} \right], \\ & \sum_{i=1}^{Ne} X_i^e = 1, \\ & \frac{\partial \rho_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p v_p}{\partial y} + \frac{\rho_p v_p}{y} = -\dot{m}_p, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_p u_p}{\partial x} + \frac{\partial N_p v_p}{\partial y} + \frac{N_p v_p}{y} = 0, \\ & \frac{\partial \rho_p u_p \cdot u_p}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p v_p \cdot u_p}{\partial y} + \nu \frac{\rho_p v_p \cdot u_p}{y} = \\ & = f_q \cdot (u - u_p) - \dot{m}_p \cdot u_p, \quad (2) \\ & \frac{\partial \rho_p u_p v_p}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p v_p^2}{\partial y} + \nu \frac{\rho_p v_p^2}{y} = \\ & = f_q \cdot (v - v_p) - \dot{m}_p \cdot v_p, \\ & \frac{\partial \rho_p u_p T_p}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p v_p T_p}{\partial y} + \nu \frac{\rho_p v_p T_p}{y} = \\ & = f_T (\alpha (T - T_p) - e_r) / C_s - \dot{m}_p T_p. \end{aligned}$$

Эта система уравнений дополняется термическим и калорическим уравнениями состояния для смеси совершенных газов:

$$P = \frac{R_0}{\mu} \rho T, \quad h = \sum_{i=1}^{Nk} X_k(P, T) h_{ki}(T),$$

в случае химически равновесного течения в газовой фазе компонентный состав газовой смеси определяется по массовому элементному составу с использованием алгоритма расчета равновесного компонентного состава смеси [7].

В этих уравнениях принято:  $\rho, p, u, v$  – плотность, давление, продольная и радиальная составляющие скорости несущей фазы;  $H_0 = h + \frac{1}{2} \bar{V}^2$  – полная энтальпия единицы массы несущей фазы;  $X_i^e, \dot{m}_i^e$  – массовая концентрация и скорость выделения  $i$ -того элемента с единицы поверхности частицы;  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи с учетом лучистого теплообмена;  $f_T = S_p N_p = \frac{6}{d_k} \frac{\rho_p}{\rho_s}$ ,  $f_q = \frac{1}{8} f_T C_d \rho \Delta V$  – коэффициенты теплового и силового взаимодействия газовой и дисперсной фаз.  $\bar{F}_p = f_q \cdot (\bar{V} - \bar{V}_p)$ ;  $C_d$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частиц;  $\rho_p$  – среднеобъемная плотность частиц (общая масса частиц в единице объема газодисперсной смеси);  $N_p$  и  $S_p$  – количество частиц в единице объема и площадь боковой поверхности частицы;  $\rho_s$  – плотность материала частиц;  $\dot{m}_p = f_T \dot{K}$ ,  $\dot{K}$  – скорость уноса массы в единице объема газодисперсной среды и с единицы поверхности частицы вследствие гетерогенных химических реакций и испарения влаги;  $\Delta V = |\bar{V} - \bar{V}_p| = \sqrt{(V_x - V_{px})^2 + (V_y - V_{py})^2}$  – скоростное отставание частиц или скорость скольжения, индексом  $p$  обозначены параметры дисперсной фазы.

Используются эффективные коэффициенты молекулярно-турбулентного переноса (индекс  $eff$ )

Для коэффициента турбулентной кинематической вязкости применяется однопараметрическая модель турбулентности “ $\nu_t - 90$ ” [9].

Систему уравнений необходимо решить при следующих граничных условиях: на оси струи ставятся условия симметрии течения, заданы параметры спутного потока. Во входном сечении струи задаются профили всех неизвестных величин.

## 2. НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ЧАСТИЦА. УРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЧАСТИЦЕ

Для иллюстрации основных положений рассмотрим сферическую частицу и в условиях нагрева со сферической симметрией. Будем анализировать изменение температуры частицы при ее движении вдоль траектории, задаваемой уравнениями

$$\frac{dx}{d\tau} = u_p, \quad \frac{dy}{d\tau} = u_p.$$

При решении такой задачи в частице вводятся две области  $0 < r < R_f$  и  $R_f \leq r < R_S$ , где  $R_f$  – определяемый в процессе решения задачи радиус фронта фазового перехода;  $R_S$  – заданный радиус внешней поверхности частицы;  $r$  – радиальная координата.

В каждой области решается уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

**Граничные условия.** В первой области:  $\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0$  при  $r = 0$  и  $T = T_f$  при  $r = R_f$ . Во второй области:  $T = T_f$  при  $r = R_f$ ; при  $r = R_S$  (на внешней поверхности) с учетом горения

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha (T_g - T_2) + Q_r,$$

где  $Q = \sum_k \sum_\alpha \dot{m}_{pk}^\alpha i_k (T_\alpha)$  – тепловой эффект гетерогенных химических реакций.

Соотношения на фронте испарения воды при

$$T_1 = T_2 = T_f,$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \dot{r} \rho_s \kappa_{H_2O} \frac{dR_f}{d\tau},$$

где  $\rho_S = \frac{\rho_C \rho_B}{(1 - \kappa_{H_2O}) \rho_B + \kappa_{H_2O} \rho_C}$  – эффективная плотность влажной частицы;  $\kappa_{H_2O}$  – доля воды в частице.

Скорость испарения воды – масса воды, испарившейся в единицу времени с единицы поверхности частицы, определяется соотношением:

$$K_{H_2O} = \rho_S \kappa_{H_2O} \frac{R_f^2}{R_S^2} \frac{dR_f}{d\tau}.$$

Скорость испарения воды в единице объема, входящая в уравнения (1) и (2), определяется соотношением

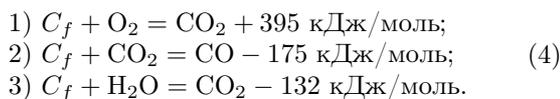
$$\dot{m}_p = \frac{6}{d_k} \frac{\rho_p}{\rho_s} K_{H_2O}.$$

Задача о прогреве частицы решается численно с применением неявных конечноразностных схем [10]. Учитывая наличие подвижной границы, уравнения удобно переписать в нормированных переменных  $y_i \in [0, 1]$ :  $y_1 = \frac{r}{R_f}$  и  $y_2 = \frac{r - R_f}{R_S - R_f}$  для первой и второй областей.

## 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ УГЛЯ С НЕСУЩИМ ГАЗОМ

Температура и состав смеси определяются при заданном давлении по найденным значениям энтальпии и массовых концентраций входящих в нее химических элементов  $X_i^e$  с использованием закона действующих масс или принципа максимума энтропии.

Скорость увеличения массы углерода в газовой смеси может быть определена с использованием стехиометрических уравнений химических реакций. Сопоставление величин кинетических констант скоростей химических реакций, которые протекают при горении углерода в воздухе [5, 6], позволяет ограничиться рассмотрением следующих реакций:



Что касается газофазных реакций, то поскольку константы скоростей этих реакций на порядок и более больше констант скоростей гетерогенных реакций, можно считать, что газ является химически равновесной смесью, состоящей из семи компонентов CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>.

В соответствии с приведенным перечнем реакций для определения скоростей образования компонент на единице поверхности частицы  $\dot{m}_k$  можно записать следующие соотношения:

$$\dot{m}_{O_2} = -k_{\text{эф},1} X_{O_2},$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{CO}_2} &= \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} k_{\text{ЭФ},1} X_{\text{O}_2} - k_{\text{ЭФ},2} X_{\text{CO}_2}, \\
 \dot{m}_{\text{CO}} &= k_{\text{ЭФ},2} \frac{2\mu_{\text{CO}}}{\mu_{\text{O}_2}} X_{\text{CO}_2} + k_{\text{ЭФ},3} \frac{\mu_{\text{CO}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} X_{\text{H}_2\text{O}}, \\
 \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} &= -k_{\text{ЭФ},3} X_{\text{H}_2\text{O}}, \\
 \dot{m}_{\text{H}_2} &= k_{\text{ЭФ},3} \frac{\mu_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} X_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где  $\mu_k$  – молярная масса  $k$ -той компоненты; индексы 1, 2, 3 – номера реакций из (4).

Скорость уноса массы углерода с единицы поверхности частицы определяется соотношением

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{CO}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{H}_2}.$$

Применяя выражение (5), получим

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_p &= (\mu_{\text{CO}_2} - \mu_{\text{O}_2}) k_{\text{ЭФ},1} \frac{1}{\mu_{\text{O}_2}} X_{\text{O}_2} + \\
 &+ (2\mu_{\text{CO}} - \mu_{\text{CO}_2}) k_{\text{ЭФ},2} \frac{1}{\mu_{\text{CO}_2}} X_{\text{CO}_2} + \\
 &+ (\mu_{\text{CO}} + \mu_{\text{H}_2} - \mu_{\text{H}_2\text{O}}) k_{\text{ЭФ},3} \frac{1}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} X_{\text{H}_2\text{O}}.
 \end{aligned}$$

Использование эффективной константы скорости реакции  $k_{\text{ЭФ}}$  позволяет учесть соотношение между кинетическим и диффузионным режимами реагирования.

Влияние теплоты гетерогенных химических реакций на температуру газа и частиц определяется параметром  $Q_r = \sum_k \sum_\alpha \dot{m}_{pk}^\alpha h_k(T) / \mu_k$ , индексы  $k$  и  $\alpha$  – номер компоненты и номер химической реакции;  $h_k$  – молярная энтальпия компоненты. Для рассматриваемой системы реакций имеем

$$\begin{aligned}
 Q_r &= (h_{\text{CO}_2}(T_p) - h_{\text{O}_2}(T)) \frac{k_{\text{ЭФ},1} X_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}} + \\
 &+ (2h_{\text{CO}}(T_p) - h_{\text{CO}_2}(T)) \frac{k_{\text{ЭФ},2} X_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}} + \\
 &+ (h_{\text{H}_2}(T_p) + h_{\text{CO}}(T_p) - h_{\text{H}_2\text{O}}(T)) \frac{k_{\text{ЭФ},3} X_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}.
 \end{aligned}$$

#### 4. ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Уравнения второго порядка и граничные условия записываются в унифицированном виде:

$$\rho u \frac{\partial f^k}{\partial z} + \rho v \frac{\partial f^k}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \alpha^k \frac{\partial f^k}{\partial r} \right) + \nu \frac{\alpha^k}{r} \frac{\partial f^k}{\partial r} + \delta^k,$$

$$b_{1,4}^k f^k + b_{2,5}^k \frac{\partial f^k}{\partial \eta} = b_{3,6}^k.$$

При  $\eta = 0$  и  $\eta = 1$  (индексы 1, 2, 3 и 4, 5, 6 соответственно). Здесь  $f^k$  – одна из функций  $u, H_0, X_i^e$

Для их решения используется маршевая конечно-разностная схема порядка  $(\Delta x, \Delta y^2)$ . Для значений функций  $f_j^{kn}$  в узлах разностной сетки  $x^n, y_j$  получим систему конечно-разностных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$A_j f_{j+1}^k + B_j f_j^k + C_j f_{j-1}^k = D_j^k, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

$$b_1^k f_1^k + b_2^k \frac{f_2^k - f_0^k}{2\Delta\eta} = b_3^k,$$

$$b_4^k f_N^k + b_5^k \frac{\tilde{f}_{N+1}^k - f_{N-1}^k}{2\Delta\eta} = b_6^k,$$

где

$$A_j = \frac{1}{S_i} \frac{1}{\Delta\eta_{j+1/2}} \left( \frac{\alpha_{j+1/2}^k}{\Delta\eta_{j+1}} + \frac{\nu}{S} \frac{\alpha_j^k}{2\eta_j} \right) - \frac{b_{i-1,j}}{2\Delta\eta_{j+1/2}},$$

$$B_j = -\frac{1}{S_i} \frac{1}{\Delta\eta_{j+1/2}} \left( \frac{\alpha_{j+1/2}^k}{\Delta\eta_{j+1}} + \frac{\alpha_{j-1/2}^k}{\Delta\eta_j} \right) - \frac{a_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$\begin{aligned}
 C_j &= \frac{1}{S_i} \frac{1}{\Delta\eta_{j+1/2}} \left( \frac{\alpha_{j-1/2}^k}{\Delta\eta_j} - \frac{\nu}{S} \frac{\alpha_j^k}{\eta_j} \frac{1}{\Delta\eta_{j+1/2}} \right) + \\
 &+ \frac{b_{i-1,j}}{\Delta\eta_{j+1/2}},
 \end{aligned}$$

$$D_j^k = -\frac{a_j^{n-1}}{\Delta x} f_j^{n-1} - \delta_j^k S_i.$$

Тильдой обозначены значения сеточной функции в фиктивных узлах. Для исключения этих значений воспользуемся конечно-разностной аппроксимацией (6), записанной для точек разностной сетки, расположенной на границе расчетной области. Для решения этих уравнений используется метод скалярной прогонки [10].

Уравнения первого порядка – уравнение неразрывности для газа и уравнения для облака частиц, записываются в виде

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial v_p \vec{G}}{\partial y} = \vec{W}.$$

Связь комплексов  $\vec{F}, \vec{G}$  и  $\vec{W}$  с параметрами облака частиц вытекает из уравнений (2).

Для конечно-разностной аппроксимации используем схему первого порядка по обеим координатам:

$$\vec{F}_j^{n+1} = \vec{F}_j^n - \frac{\Delta x}{\Delta\eta} \left[ \left( v_p \vec{G}_p^* \right)_{j+0.5}^n - \left( v_p \vec{G}_p^* \right)_{j-0.5}^n \right] +$$

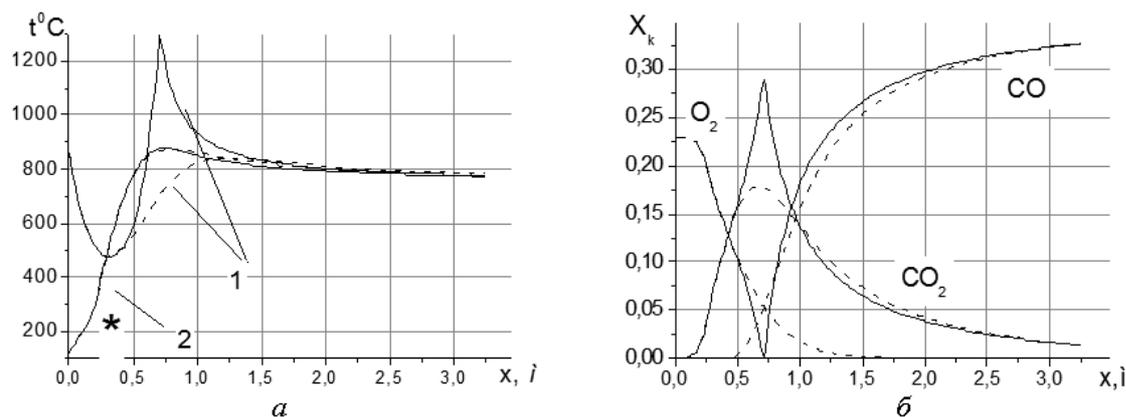


Рис. 1. Влияние газозафазных химических реакций на изменение температуры *a* и массовых концентраций компонент *б* вдоль потока

$$+\Delta x \vec{W}_j^n.$$

Потоки массы, импульса и энергии дисперсной фазы определяются по противопоточно направленной схеме, т.е. на границе между узлами с номерами  $j-1$  и  $j$  для комплексов  $\vec{G}_p^*$  считаются так:

$$(v_{pn} \vec{G}_p^*)_{j-0.5} = \begin{cases} \vec{G}_{p_{j-1}}^* \frac{v_{pn_{j-1}} + v_{pn_j}}{2}, \\ \vec{G}_{p_j}^* \frac{v_{pn_{j-1}} + v_{pn_j}}{2}, \end{cases}$$

при  $v_{pn_{j-1}} + v_{pn_j} \geq 0$ , и  $v_{pn_{j-1}} + v_{pn_j} < 0$  соответственно.

При решении уравнения теплопроводности (3), описывающего изменение температуры внутри частиц, используются элементы дискретно-траекторного метода, при этом  $\Delta \tau = \frac{\Delta x}{u_p}$ . При переходе на новый слой  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$  отклонение частицы от узла разностной сетки определяется соотношением  $y_{p,j} = y_j + \Delta y_p$ , где  $\Delta y_{p,j} = \frac{v_{p_j}^{i-1}}{u_{p_j}^{i-1}} \Delta x$ . Для вычисления распределения температуры внутри частиц, расположенных в узлах основной разностной сетки с координатами  $(x_{i+1}, y_j)$ , используется линейная интерполяция полей температуры частиц, расположенных в точках  $(x_{i+1}, y_{p,j}), (x_{i+1}, y_{p,j-1})$ .

## 5. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СУХИХ И ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ЧАСТИЦ

Характерные особенности прогрева и горения сухих и влажных частиц угля в горячем воздушном газовом потоке иллюстрируются данными,

приведенными на рис. 1 и 2. Результаты получены в рамках модели прогрева частиц, при одинаковой температуре в пределах частицы. На этих рисунках показано влияние газозафазных химических реакций в потоке на изменение температуры (*a*) и массовых концентраций компонент (*б*) вдоль потока. Линии 1 и 2 соответствуют температуре газа и частиц угля. Сплошные линии – с учетом равновесных химических реакций в газовом потоке, штриховые – химически замороженное течение газа. Опорные значения параметров: скорость потока воздуха и частиц 1 м/с, температура воздуха 900°C, частиц 100°C.

Изменение температуры газа и частиц имеет немонокотный характер. На первом этапе имеет место передача тепла от горячего газа к холодным частицам. После прогрева частиц начинается их интенсивное горение (место воспламенения помечено звездочкой), преимущественно в реакции 1, и повышение температуры частиц. В некоторый момент времени температура частиц становится больше температуры газа и частицы начинают нагревать газ. В рассмотренном примере массовая доля частиц угля, которая определяется как отношение массовых расходов угля и воздуха во входном сечении, равна  $\kappa = 1.0$ . Так как при стехиометрическом соотношении воздуха и углерода,  $\kappa = 0.086$ , то в рассматриваемом примере происходит полное выгорание кислорода воздуха. Имеет место газификация угля. По мере выгорания кислорода становится заметным вклад взаимодействия двуокиси углерода с углеродом (реакция 3 из соотношений (4)), при котором тепло поглощается. Это приводит к снижению температуры частиц и к последующему охлаждению газа ча-

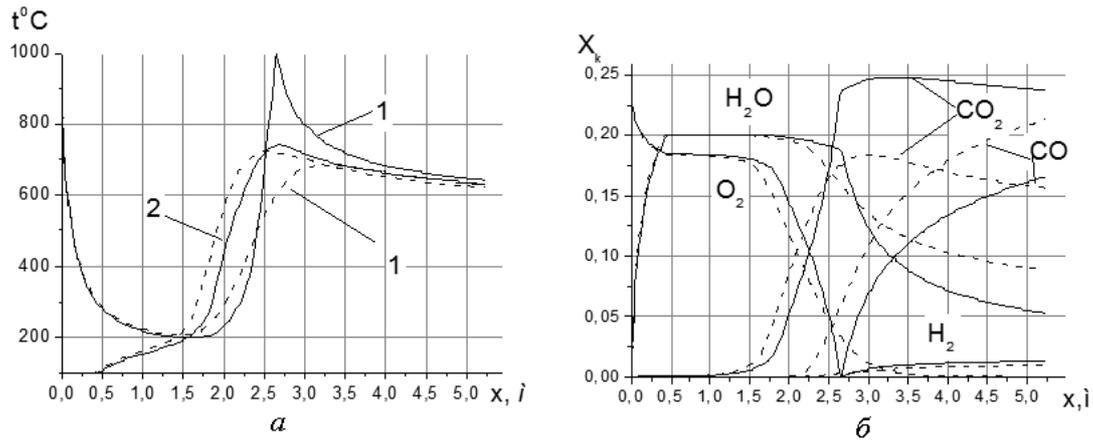


Рис. 2. Изменение параметров газа и влажных частиц вдоль потока

стицами. Рассмотрение химических реакций в газовой фазе приводит к догоранию CO в газовой смеси (реакция  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 570 \text{ кДж/моль}$ ) – всплеск концентрации  $\text{CO}_2$  на рис. 1, б (сплошные линии) – приводит к более интенсивному повышению температуры газа. После полного выгорания окиси углерода температуры газа и частиц сравниваются.

На рис. 2 показаны результаты, относящиеся к прогреву и горению влажных частиц угля. Доля воды в частицах 0.25. Наличие влаги приводит к более интенсивному охлаждению несущего газа на этапе испарения влаги из частиц. Температура частиц остается равной температуре фазового перехода.

После испарения влаги начинается нагрев частиц с последующим воспламенением. Далее картина изменения температуры газа и частиц аналогична картине для сухих частиц со сдвигом пиковых значений температуры вниз по потоку. Наличие паров воды в несущем газе вносит свои изменения в характер изменения состава газообразных продуктов сгорания

Для сухих частиц после исчерпания кислорода воздуха горение угольных частиц происходит при взаимодействии углерода с  $\text{CO}_2$ , что приводит к резкому уменьшению (вплоть до нуля)  $X_{\text{CO}_2}$  и возрастанию  $X_{\text{CO}}$  (рис 1, б). При наличии влаги углерод в частицах взаимодействует с парами воды (реакция (3) из соотношений (4)), вследствие чего в потоке появляется водород и при замороженных химических реакциях в газовой фазе (штриховые линии на рисунках) существенно замедляется уменьшение  $\text{CO}_2$ . При наличии реакций в га-

зовой фазе взаимодействие паров воды с окисью углерода приводит к возрастанию  $X_{\text{CO}_2}$ , к замедлению роста  $X_{\text{CO}}$  и к более быстрому уменьшению концентрации паров воды вдоль потока (сплошные линии).

Влияние изменения температуры внутри сухих (а) и влажных (б) частиц иллюстрируется данными, приведенными на рис. 3. Линиями 2 и 2, а показано изменение температуры на поверхности и в центре частицы, линия 1 – температура газа. Сплошная линия – расчет с учетом переменной температуры в объеме частицы, штриховая – среднеобъемная модель частицы.

Для сухих частиц учет переменной температуры внутри частицы слабо влияет на характер ее прогрева и воспламенения (рис 3, а). Наличие влаги в частице приводит к существенным изменениям в характере изменения параметров. Имеет место нагрев поверхности частицы и повышение ее температуры (линия 2) до значений, при которых начинается горение углерода и, как следствие, более интенсивное повышение температуры поверхности частицы. Температура в центре частицы в течение некоторого времени остается постоянной (линия 2, а). Испарение влаги происходит внутри частицы. Воспламенение углерода на поверхности частицы до полного испарения влаги, которое не может быть учтено в модели изотермической частицы, приводит к более интенсивному протеканию процессов испарения, прогрева частиц и их горения. Температура частиц и продуктов сгорания принимает пиковые значения на более коротком расстоянии от входного сечения. Изменение по времени радиуса фронта испарения  $\bar{R}_f$  и ин-

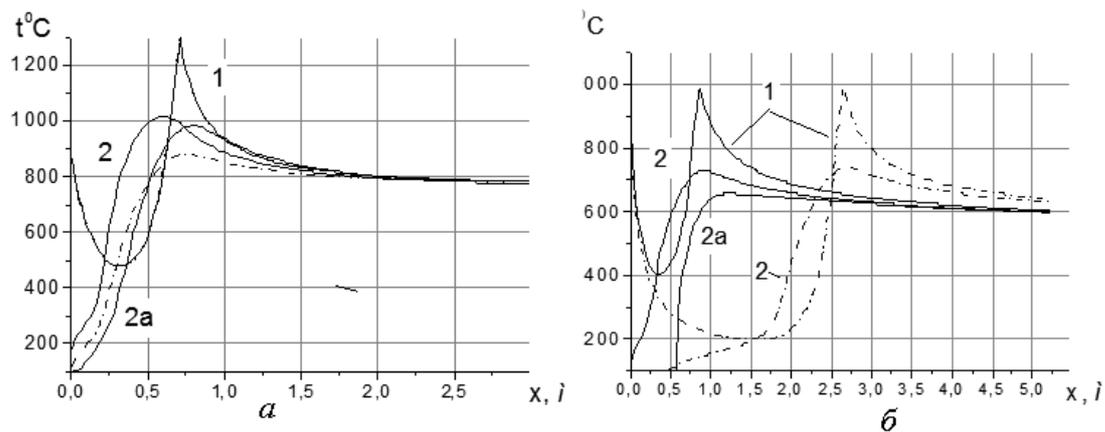


Рис. 3. Изменение температуры газа и сухой (а) и влажной (б) частиц при учете объемного изменения температуры

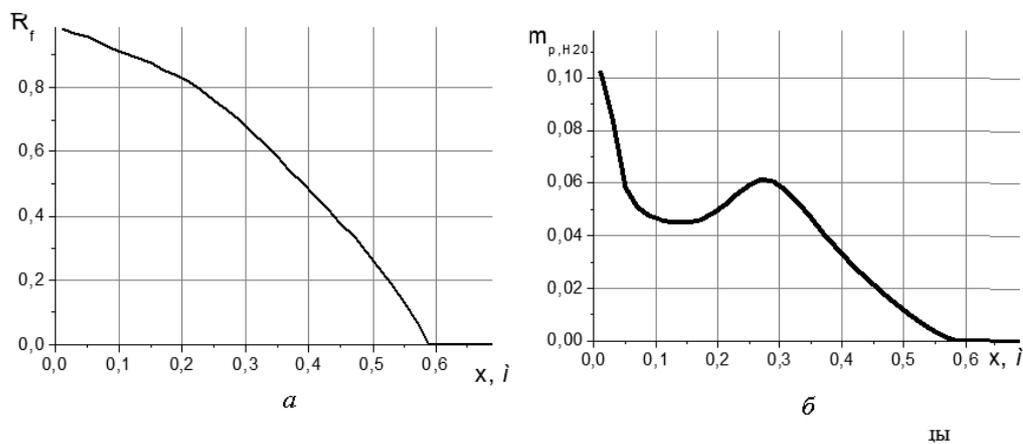


Рис. 4. Изменение радиуса фронта испарения (а) интенсивности испарения влаги (б) из частицы

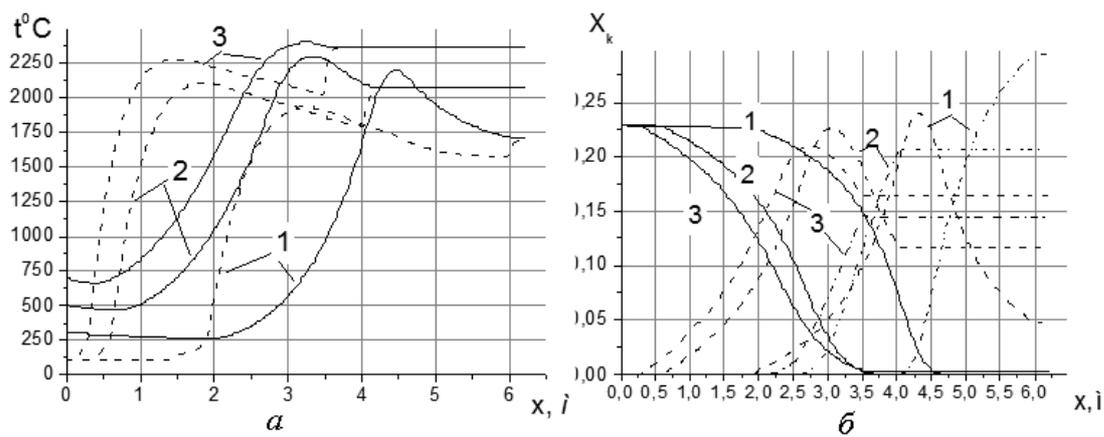


Рис. 5. Влияние начальной температуры воздуха на прогрев и воспламенение влажных частиц

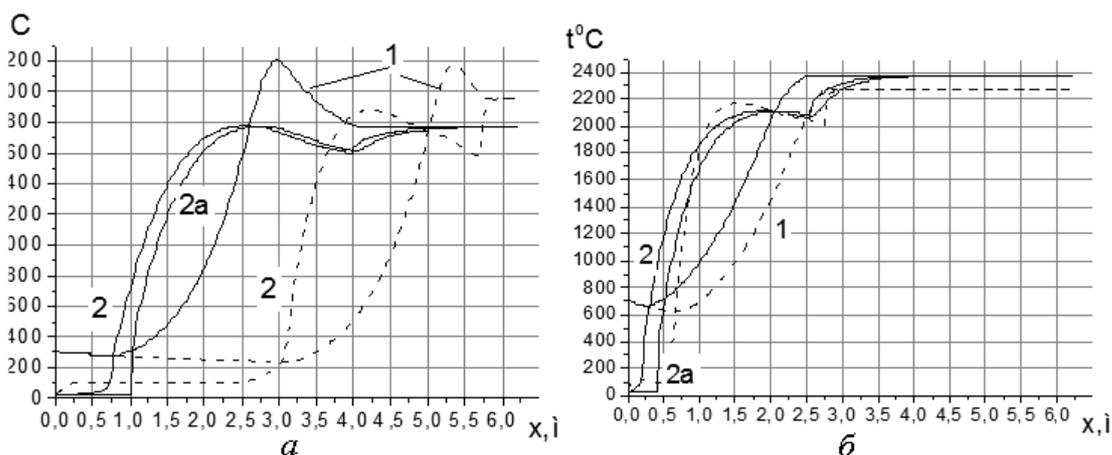


Рис. 6. Изменение температуры несущего газа и частицы вдоль потока

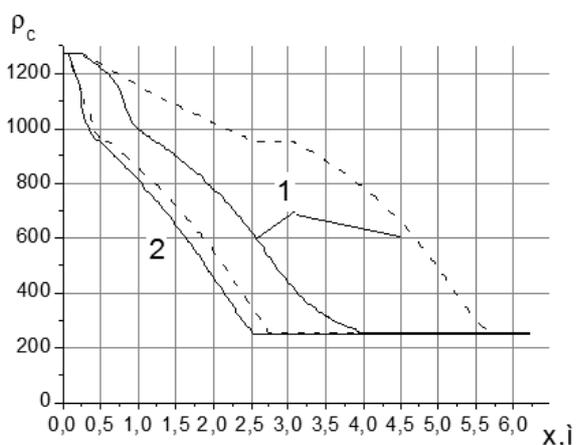


Рис. 7. Изменение плотности угольной частицы

тенсивности испарения влаги  $\dot{m}_{p, H_2O}$ ,  $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{сек}} \right]$  показано на рис. 4. Возрастание интенсивности испарения на расстоянии 0,3 м от входного сечения вызвано воспламенением частицы. После испарения влаги температура в центре частицы резко возрастает и приближается к температуре поверхности.

## 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В РЕАКЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Представляет интерес проанализировать зависимость параметров горения угольных частиц от температуры воздуха в топочном пространстве. При проведении расчетов массовая доля частиц задавалась таким образом, чтобы при полном

выгорании углерода в них был исчерпан весь кислород воздуха. Результаты расчетов для модели изотермической частицы представлены на рис. 5. Начальная температура воздуха 300°C, 500°C и 700°C (линии 1, 2, 3). На рис. 5, а показано изменение температуры газа (сплошные линии) и частиц (штриховые). На рис. 5, б приведено изменение концентраций кислорода (сплошные линии), двуокиси (штриховые) и окиси (штрих-пунктир) углерода.

Степень влияния учета объемного распределения температуры в пределах частицы зависит от начальной температуры воздуха. Это иллюстрируется рисунком 6, на котором представлено полученное при начальной температуре воздуха 300°C и 700°C (рис. 6, а, б) изменение температуры несущего газа и частицы вдоль потока, полученные в рамках модели, учитывающей объемное распределение температуры в частице (сплошные линии) и в рамках модели изотермической частицы (штриховая линия). Цифры 1 и 2 относятся к газу и частице. Линия 2,а – центр неизотермической частицы.

При температуре воздуха 300°C в первом случае, происходит более быстрый нагрев поверхности частицы и, как следствие, более раннее ее воспламенение. При температуре воздуха 700°C различия в темпах нагрева и воспламенения существенно меньше. Это подтверждает рис. 7, на котором представлены изменения вдоль потока плотности угольной частицы  $\rho_c$ . Зольность и влажность угля –  $A_z = 20\%$ ,  $W_p = 25\%$ . После испарения влаги (в предположении, что размеры частицы не изменяются) плотность угля становится равной 954 кг/м<sup>3</sup>, а после полного выгорания углерода плотность пористой частицы золы равна 255

кг/м<sup>3</sup>. Как и раннее, сплошные линии и штриховые относятся к результатам, полученным для модели неизотермической и изотермической частиц.

## ВЫВОДЫ

Развита математическая модель газодисперсной струи, которая учитывает влияние неравномерного нагрева сухих и влагонасыщенных частичек угля на время и особенности их прогрева и воспламенения в спутном потоке воздуха. Показано, что учет распределения температуры в пределах частиц может приводить к уменьшению (в два и больше раза) времени их прогрева и воспламенения. Выяснены особенности влияния параметров ввода пылевидного угля в поток высокотемпературного воздуха на особенности горения. Показано, что учет изменения температуры внутри частиц существенно влияет на расчетное время воспламенения и сгорания частиц при относительно небольшой начальной температуре подаваемого воздуха. При повышении температуры воздуха влияние выбора модели частицы (изотермическая и неизотермическая частица) нивелируется.

1. Стернин П. Е., Шрайбер А. Л. Многофазные течения газа с частицами.– М.: Машиностроение, 1994.– 212 с.

2. Рычков А. Д., Жуков М. Ф. Математическое моделирование процессов воспламенения пылеугольной аэрозоли струей низкотемпературной плазмы // Прикладная механика и техническая физика.– 1998.– **39**, N 3.– С. 134–140.
3. Sirignano W. A. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays.– Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999.– 311 p.
4. Волков К. Н. Движение и тепломассообмен дисперсной примеси в турбулентных неизотермических струях газа и низкотемпературной плазмы // Прикладная механика и техническая физика.– 2008.– **49**, N 3.– С. 95–108.
5. Виленский Т. В., Сабо Ш. Расчет горения угольных смесей // Энергетика.– 1988.– N 7.– С. 90–93.
6. Энхжаргал Х., Саломатов В. В. Математическое моделирование термодготовки и горения угольной частицы. II Стадия сушки // Инженерно-физический журнал.– 2011.– **84**, N 2.– С. 239–247.
7. Тимошенко В. И. Теоретические основы технической газовой динамики.– Киев: Наук. думка, 2013.– 426 с.
8. Тимошенко В. И. Влияние объемного распределения температуры в угольных частицах на их прогрев и воспламенение в газодисперсном потоке // Инженерно-физический журнал.– 2014.– **87**, N 4.– С. 767–771.
9. Гуляев А. Н., Козлов В. Е., Секундов А. Н. К созданию универсальной однопараметрической модели турбулентной вязкости // Механика жидкости и газа.– 1993.– N 4.– С. 69–80.
10. Калиткин Н. Н. Численные методы.– М.: Наука, 1978.– 318 с.