

Г. А. КАМАЛОВА

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ТОПОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

С помощью численной модели многокомпонентных турбулентных реагирующих газовых смесей проводится расчет пространственного горения турбулентных струй в топочном устройстве. Исследованы взаимодействия турбулентных течений с химическими реакциями. Получено влияние исходного значения температуры газовых смесей на конфигурации факела.

Основные проблемы турбулентных течений с химическими реакциями связаны с особенностями, заключающимися в чрезвычайно сложном характере взаимного влияния процессов турбулентного переноса и процессов химического реагирования. Для современного этапа теории турбулентного горения характерно применение эйлерова подхода в описании течений с химическими реакциями, а именно подхода, основанного на использовании уравнений переноса, учитывающих кинетику химических реакций.

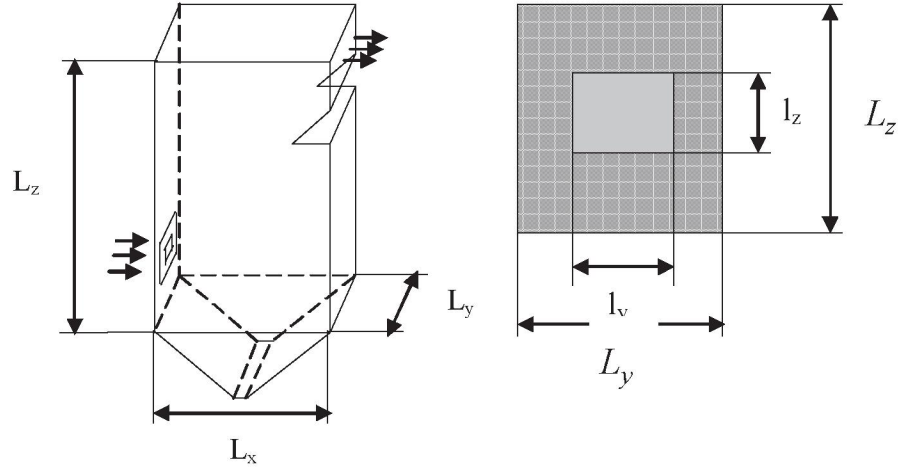
Вопросы двумерного турбулентного факела на основе уравнений турбулентного пограничного слоя и параболизированных уравнений Навье-Стокса изучены в работах [1, 2]. В работе [3], где процесс горения протекает в топочном устрой-

стве, в основном проводятся тестовые расчеты и практически отсутствует численное исследование влияния режимных параметров на конфигурации факела, зависимости кинетической реакций от процесса турбулентных течений.

Целью данной статьи является численный расчет турбулентных струйных течений реагирующих газовых смесей в топочном устройстве на основе полуэмпирической $k - \varepsilon$ модели турбулентности, изучение влияния входного значения температуры газовых смесей на конфигурации факела и химических реакций на газодинамический процесс турбулентных течений.

Постановка задачи. Рассматривается процесс горения в топочном устройстве, в котором из внутренней части горелки вдувается газовая

Рис. 1. Схема топочного устройства и амбразуры горелки



смесь ($CH_4, CO, C_2H_2, H_2, N_2$), из внешней части – вторичный воздух (O_2, N_2) (рис. 1).

При этом исходной является система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \mathcal{E}_m, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \\ = \nabla \cdot \mathcal{E}(\vec{u}) - \frac{1}{\alpha^2} \nabla P - \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \rho \vec{g}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} I) = \nabla \cdot \vec{J} - P \nabla \cdot \vec{u} - \rho \varepsilon + \mathcal{E}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \\ = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \vec{u} + \mathcal{E} : \nabla \vec{u} - \rho \varepsilon, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] - \\ - \left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon_1} - c_{\varepsilon_3} \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot \vec{u} + \frac{\varepsilon}{k} [c_{\varepsilon_1} \mathcal{E} : \nabla \vec{u} - c_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon], \quad (6) \end{aligned}$$

$$P = R_0 T \sum_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right), \quad c_p(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) c_{p_m}(T), \quad (7)$$

$$I(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) I_m(T), \quad I_m(T) = h_m(T) - \frac{R_0 T}{W_m}, \quad (8)$$

где $\vec{J} = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right)$ – вектор теплового потока, $K = \frac{\mu c_p}{Pr}$ – коэффициент теплопроводности, $D = \frac{\mu}{\rho Sc}$ – коэффициент диффузии,

$\mathcal{E}(\vec{u}) = \mu [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{u} \vec{e}$ – тензор вязких напряжений, $\mu = \mu_{air} + \rho c_\mu k^2 / \varepsilon$ – коэффициент вязкости, $\mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{A_2 + T}$ – коэффициент вязкости для воздуха, t – время, ρ_m – парциальная плотность m -й компоненты, $\vec{u} = (u, v, w)$ – компоненты скоростей газа, ρ – плотность смеси, P – давление, I – удельная внутренняя энергия, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, T – температура газа, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, W_m – молекулярный вес m -й компоненты, \vec{g} – сила тяжести, $c_{p_m}(T)$, $h_m(T)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении и энтальпия m -й компоненты, определенные из таблицы JANAF,

$\mathcal{E}_m = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \alpha_r$, $\mathcal{E} = \sum_r \sum_m \times$

$\times (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \alpha_r$ – дополнительные

члены, появляющиеся за счет химической реакции, a_{mr}, b_{mr} – стехиометрические коэффициенты, $(\Delta h_f^0)_m$ – теплота образования m -й компоненты, ω_r – скорость химической реакции, индекс r – число реакций, m – число компонентов.

Скорость химических реакций ω_r описывается законом Аррениуса.

Исходная система уравнений замыкается с помощью $k - \varepsilon$ модели турбулентности. Связь между кинетической энергией турбулентности и скоростью ее диссипации задается в форме

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Здесь l – масштаб турбулентности.

Константы $k - \varepsilon$ модели турбулентности приведены ниже:

c_μ	c_{ε_1}	c_{ε_2}	c_{ε_3}	Pr_k	Pr_ε
0,09	1,44	1,92	-1,0	1,0	1,3

Описание химического реагирования газовых компонентов CH_4, C_2H_2 с воздухом проводится на основе химической модели, изложенной в [4, 5]. В соответствии с ней газовая смесь состоит из химически активных компонентов CH_4, C_2H_2, H_2CO, O_2 и инертного азота N_2 .

Начальные и граничные условия: в начальный момент газ находится в состоянии покоя, плотности компонентов, распределение температуры, кинетическая энергия турбулентности и масштаб турбулентности постоянны.

На входе: внутри горелки – газовая смесь ($CH_4, N_2, C_2H_2, H_2, CO$)

$$u = u_g, v = 0, w = 0,$$

$$\rho_m = (\rho_m)_g, T = T_g, k = k_0, l = l_0$$

внешней части горелки – вторичный воздух (O_2, N_2)

$$u = u_{air}, v = 0, w = 0,$$

$$\rho_m = (\rho_m)_{air}, T = T_{air}, k = k_0, l = l_0.$$

На стенках задается для поля скорости и температуры турбулентный закон стенки, тангенциальный компонент скоростей которого определяется

логарифмическим профилем [6], для кинетической энергии турбулентности, концентраций компонент газа условие отсутствие потока через стенку.

На выходе задаются мягкие граничные условия

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0, f = (u, \rho_m, k, l).$$

Метод решения. Метод решения исходных дифференциальных уравнений (1)–(8) полностью описан в работе [7]. Этапы решения задачи вкратце:

Этап А. На первом этапе решаются уравнения с источниками кинетических членов явным образом. Скорость химических реакций определяется аналогично [6].

Этап В. Определяются промежуточные значения искомых величин с учетом диффузии, поля давления, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Рассматриваемые на данном этапе уравнения линейризуются относительно искомых величин и решаются итерационно методом сопряженных разностей [8].

Этап С. Вычисляется конвективный перенос рассматриваемых величин с использованием схемы донорской ячейки [6].

Результаты расчетов. Задача решается в контрольном объеме размером $41 \times 41 \times 76$. Для расчета используется разработанный программный комплекс PFS-CFD (Plasma-Fuel System – Computational Fluid Dynamics) к решению задачи моделирования процессов горения в топочных устройствах. Высота топочного устройства 3,5 м, ширина 1 м, глубина 0,5 м. Размеры прямоугольного отверстия следующие: для газовых компонентов (внутреннее) высота – 0,14 м и ширина – 0,09 м, для вторичного воздуха (внешнее) высота – 0,33 м и ширина – 0,26 м. С параметрами $k_0 = 0,036 \text{ м}^2/\text{с}^2$, масштаб длины $l_0 = 0,1 \text{ м}$, $T_g = 704 \text{ К}$.

На рис. 2, а, б, г, д приведены поля температуры и скоростей в вертикальной плоскости симметрии струи без горения (рис. 2, а и г) и при его наличии (рис. 2, б и д). Из картины полей температур следует, что горение газовых смесей, вызывая интенсивное тепловыделение, приводит к росту температуры в зонах горения. При этом максимум температуры увеличивается почти в 2,5 раза, т.е. с $T_{max} = 742 \text{ К}$ до $T_{max} = 1958 \text{ К}$, и, как видно из рис. 2, б, зона воспламенения распространяется

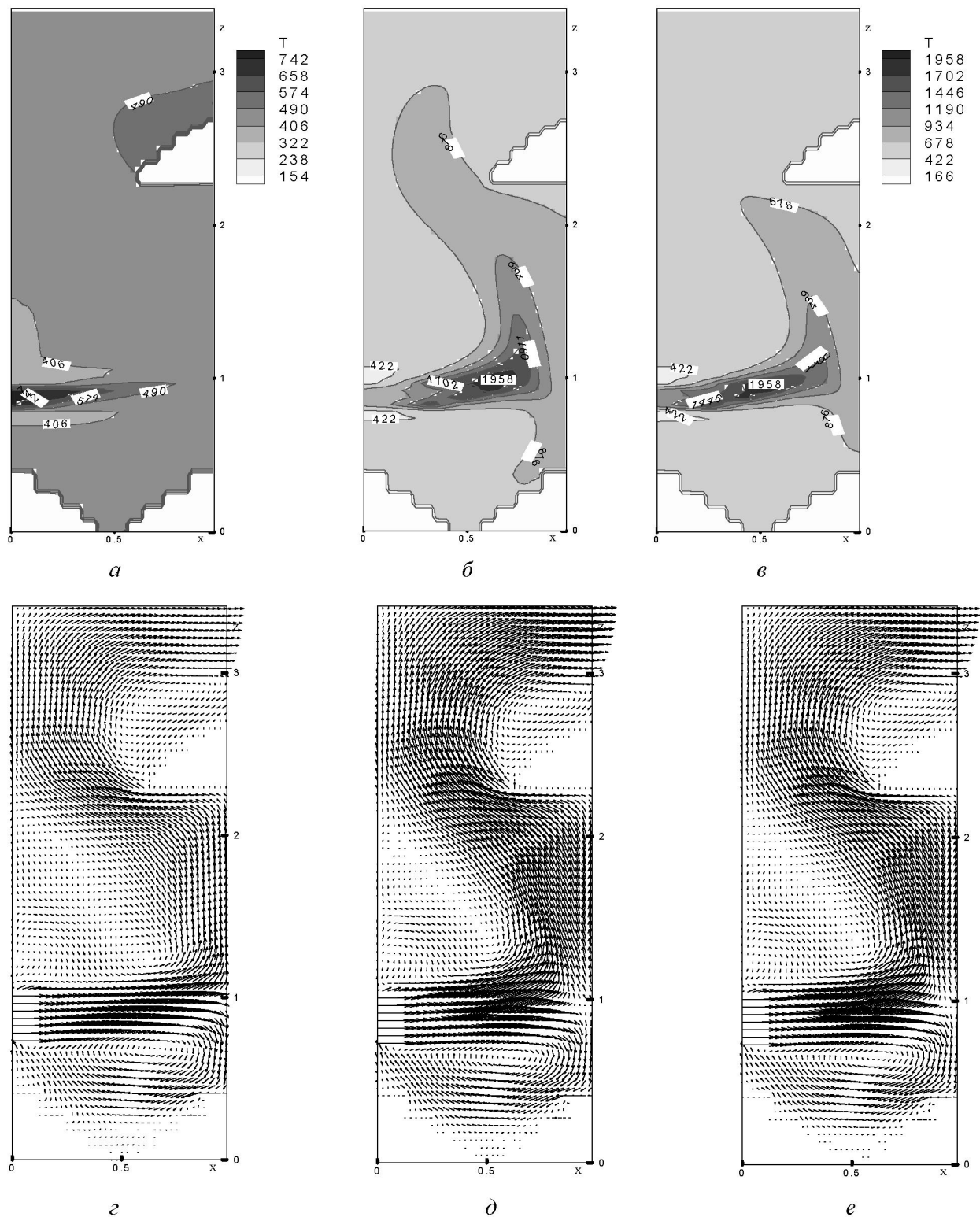


Рис. 2. Распределения температуры и поле вектора скорости в вертикальной плоскости симметрии струи:

$$a, б, г, д - T_g = 704 \text{ K}; \quad в, е - T_g = 1100 \text{ K}$$

вплоть до внешней стенки. Ускорение потока за счет протекания реакций показано на рис. 2, г, д.

Увеличение входного значения температуры газовых смесей (от $T_g = 704$ К до $T_g = 1100$ К) приводит тому, что зона горения смещается к центру топочного устройства (см. рис. 2, б и в). Для входного $T_g = 1100$ К область активного горения локализуется в центре устройства (см. рис. 2, в; $T_g = 1100$ К).

Таким образом, вдув газовых смесей в горячем виде приводит к быстрому смешиванию их с кислородом. И как следует из численных расчетов, изменения T_g в меньшей степени влияют на динамические характеристики, что и подтверждает картина полей скорости (см. рис. 2, е).

Смещения зоны горения демонстрирует также поле концентрации кислорода O_2 . Так, концентрация кислорода, равная 0,16 кг/кг (рис. 3, а), на расстоянии 0,5 м от входного отверстия при

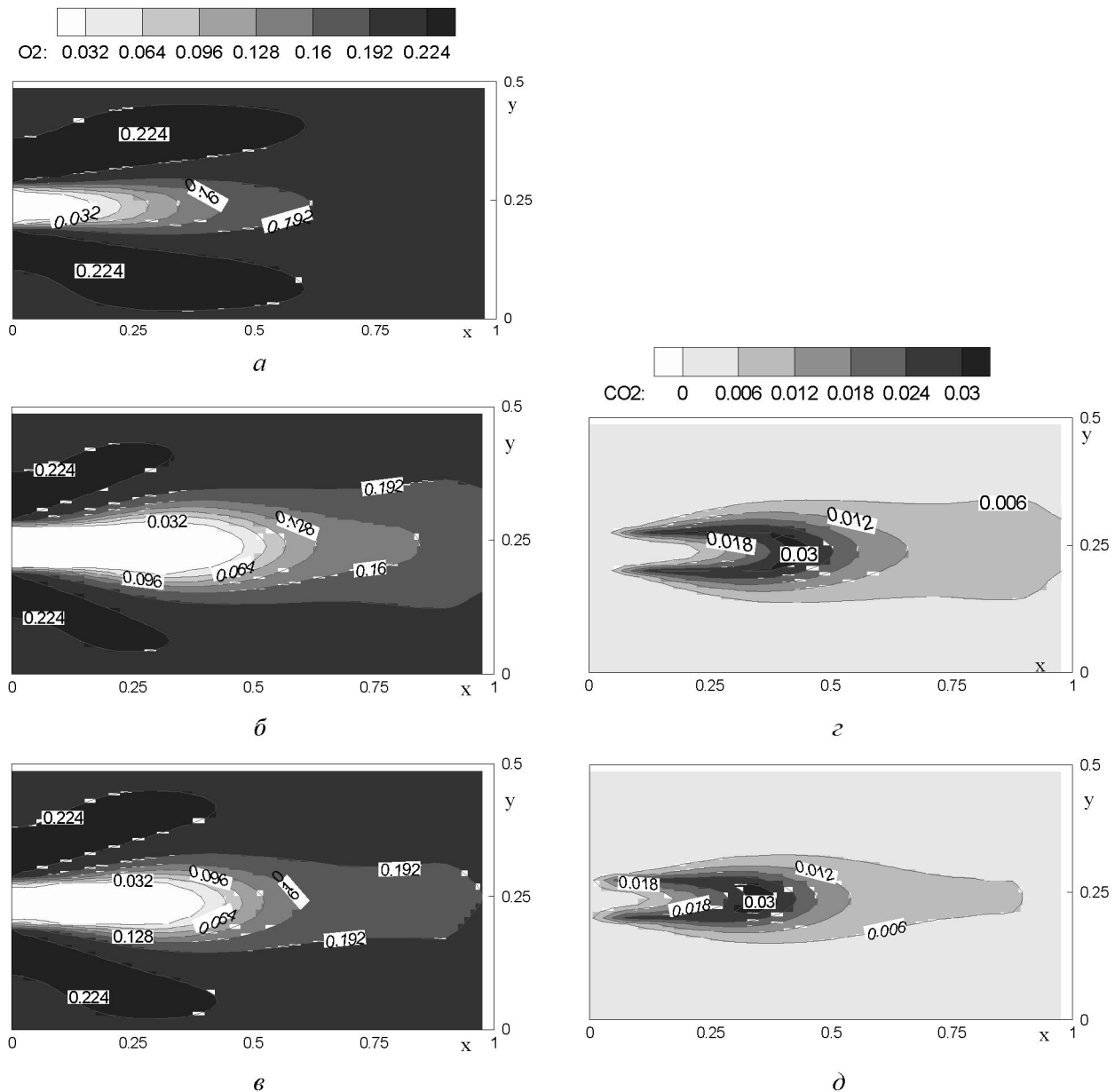


Рис. 3. Распределения концентрации O_2 (слева) и CO_2 (справа) в горизонтальной плоскости симметрии струи:

а, б, г – $T_g = 704$ К; в, д – $T_g = 1100$ К

отсутствии горения, после полного сгорания газовых смесей (рис. 3, б) равна 0,032 кг/кг при $T_g = 704 \text{ К}$, в то время как для $T_g = 1100 \text{ К}$ она составляет 0,096 кг/кг.

Образование двуокси углерода CO_2 (см. рис. 3, г и д) противоположно полученным для кислорода: концентрация CO_2 , равная нулю в топном устройстве в начале процесса, возрастает до 0,03 кг/кг в зоне горения. Как следует из этих рисунков, максимум CO_2 образуется на расстоянии $0,4 \text{ м} \leq x \leq 0,5 \text{ м}$ в первом случае, во втором – на расстоянии $0,3 \text{ м} \leq x \leq 0,4 \text{ м}$ от входного отверстия.

В заключение отметим, что в случае включения химических реакций в турбулентный процесс ускоряется поток, а увеличение температуры газовых смесей приводит к быстрому горению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вулис Л.А., Еришн Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. Л., 1968. 203 с.
2. Алиев Ф., Жумаев З.Ш. Струйные течения реагирующих газов. Ташкент: Фан, 1987. 132 с.
3. Stankov P., Toporov D. Modeling of Turbulence-chemical Reactions Interaction In Industrial Furnace Using an Advanced Model // Sixth international conference on "Technologies and Combustion for a clean environment". Portugal, 2001. P. 489-494.
4. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред: Учеб. пособие для студентов

механико-математических и физических специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1985. 464 с.

5. Amsden A.A., Gentry R.A., Daly B.J. KIVA COAL: A modified version of the KIVA program for calculating the combustion dynamics of a coal-water slurry in a diesel engine cylinder, Los Alamos National Laboratory report, 1987. 68 p.

6. Amsden A.A., Butler T.D., O'Rourke. P.J. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays, Los Alamos National Laboratory report, 1989. 158 p.

7. Камалова Г.А., Найманова А.Ж. Математическое моделирование газодинамических процессов двухфазной среды в устройствах различной конфигурации // Математический журнал. Алматы, 2005. Т. 5, №1(15). С. 52-66.

8. Holst M.J. Notes on the KIVA-II software and chemically reactive fluid mechanics, Livermore, California, 1992. 40 p.

Резюме

Көпкомпонентті турбуленттік реакциялық газ қоспаларының сандық моделінің көмегімен пештік құрылғыда кеңістіктік жану үрдісін есептеу жүргізіледі. Турбуленттік ағындардың химиялық реакциялармен өзара әсері зерттелінді. Газ қоспаларының бастапқы температурасының факел конфигурациясына әсері алынды.

Summary

With the help of the numerical model of multi-species turbulent reacting gas mixtures the spatial burning of turbulent jet in furnace device is calculated account. The interactions of turbulent flows with chemical reactions are investigated. The influence of a reference value of temperature of gas mixtures on a configuration of a torch is received.

Институт математики МОН РК,
г. Алматы

Поступила 2.04.06г.