

УДК 536.46:532.517.4

А. С. АСКАРОВА, Е. И. ЛАВРИЦЕВА, М. Ж. РЫСПАЕВА

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА

На основе решения 3-мерных уравнений переноса в реагирующих течениях получены поля основных характеристик процесса горения в виде распределений температуры и концентрации газообразных (CO , CO_2) продуктов химических реакций горения при горении монодисперсного пылеугольного факела для различных диаметров пылеугольных частиц (60 и 90 мкм). Проведен сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов.

При исследовании широкого круга современных задач науки и техники моделирование тепло- и массообменных процессов приобретает особое значение и имеет огромное практическое применение. Основными инструментами теоретического исследования нелинейных процессов теплопереноса и движения среды с учетом разнообразных физических явлений, таких, как лучистый теплообмен, горение и др., является численный и вычислительный эксперимент. При этом математическое моделирование включает в себя не только разработку численных методов и проведение численных расчетов, но и глубокий анализ рассматриваемой модели, ее адекватности реальному процессу. Горение является сложным физико-химическим процессом, протекание которого необходимо анализировать в зависимости от влияния многочисленных физических и химических параметров реакции горения.

В работе изучено влияние диаметра частиц монодисперсной угольной пыли на процесс конвективного теплопереноса в реагирующих пылегазовых потоках в областях реальной геометрии.

Вычислительные эксперименты в работе были проведены для двух размеров угольных частиц с использованием вычислительных методов на базе программного комплекса FLOREAN для моделирования течений, переноса тепла, горения и образования загрязняющих веществ [1]. Данный программный комплекс был адаптирован к казахстанским энергетическим объектам и позволяет проводить широкий круг вычислительных экспериментов.

В качестве исходных уравнений для моделирования турбулентного переноса в турбулентном

пылегазовом потоке с химическими реакциями используются уравнения Навье–Стокса, дополненные соответствующими уравнениями химической кинетики, уравнениями сохранения компонентов смеси с учетом влияния переменных свойств среды и размеров угольных частиц.

Обобщенное транспортное уравнение в тензорной форме для транспортной величины ϕ :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (1)$$

В зависимости от выбора ϕ транспортное уравнение запишется в виде закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где $\phi = 1$ $\Gamma_\phi = 0$ $S_\phi = 0$;

закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i, \quad (3)$$

где $\phi = u_i$ $\Gamma_\phi = \mu$

$$S_\phi = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \cdot g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right);$$

закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h, \quad (4)$$

где

$$\phi = h \quad \Gamma_\phi = \frac{\mu}{Pr} \quad S_\phi = S_h. \quad (5)$$

При рассмотрении процессов теплообмена в технических реагирующих течениях в камерах сгорания теплообмен посредством излучения вносит наибольший вклад в полный теплообмен. В зоне пламени вклад лучистого теплообмена составляет до 90%. В работе для описания лучистого теплообмена применяется шестипоточная модель в декартовых координатах, предложенная Де Марко и Ф. Локвудом [3]. В этой модели распределение потока энергии излучения на соответствующих участках аппроксимируется с помощью степенных рядов и сферических функций. Распределение интенсивности по различным направлениям аппроксимируется с помощью степенного ряда Тэйлора по телесному углу.

Источниковый член, связанный с лучистым теплопереносом, в уравнении баланса энергии (4) получается путем интегрирования суммарной интенсивности по телесному углу $\Omega = 4\pi$. Таким образом, имеем

$$S_{h,Str} = \frac{4\pi}{3} \cdot K_{abs} (B_1 + B_2 + B_3) - 4 \cdot K_{abs} \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (6)$$

При определении интегральных коэффициентов поглощения K_{abs} необходимо принимать во внимание механизмы излучения газа и твердых частиц. Если существует термодинамическое равновесие между газом и частицами твердого вещества, то излучение суспензии описывается путем сложения излучений пыли и газа. Таким образом, доля, вносимая газом и твердыми частицами, описывается суммой [4]:

$$K_{abs} = K_{abs,G} + \sum K_{abs,P,k}. \quad (7)$$

Если в реагирующих течениях содержатся вещества в твердой фазе, необходимо учесть то, что влияние твердых частиц на теплообмен излучением может оказаться в несколько раз больше, чем влияние компонент в газовой фазе (водяной пар и диоксид углерода).

Для твердых частиц имеем

$$K_{abs,P,k} = X_{abs} \cdot \tilde{n}_{P,k} \cdot d_{P,k}^2 \cdot \frac{\pi}{4}. \quad (8)$$

Здесь $\tilde{n}_{P,k}$ – число частиц в элементе объема. Коэффициент X_{abs} определяется экспериментально и для пылеугольного пламени $X_{abs} = 0,85$ [4].

Закон сохранения отдельной компоненты реакции имеет вид

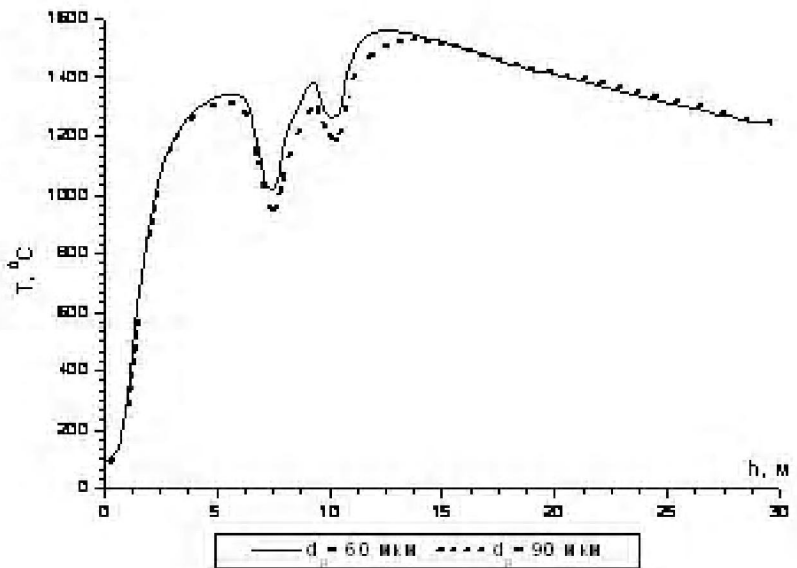
$$\frac{\partial(\rho c_\beta^*)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho c_\beta^* u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \cdot D_{c_\beta^*} \cdot \frac{\partial c_\beta^*}{\partial x_i} \right) + S_\beta, \quad (9)$$

где $\phi = c_\beta^*$ $\Gamma_\phi = \rho \cdot D_{c_\beta^*}$ $S_\phi = S_\beta$.

Результаты вычислительного эксперимента для твердых частиц различного диаметра приведены ниже.

На рис. 1 показано сравнение температурных полей в случае горения пылеугольного факела для различных диаметров частиц угольной пыли. Анализ данного распределения показывает, что в области горелок в случае горения мелких частиц ($d_p = 60$ мкм) наблюдается более высокая температура. Однако по мере удаления от

Рис. 1. Распределение температуры по высоте топочной камеры для $d_p = 60$ мкм и $d_p = 90$ мкм



области интенсивного горения температуры выравниваются.

На выходе из топочной камеры при использовании угольной пыли более грубого помола ($d_p = 90$ мкм) температура немного повышается, что соответствует данным экспериментальных испытаний [7]. Исследования авторов [7] показали, что при увеличении среднего диаметра частиц наблюдается увеличение температуры газов на выходе из топки, что является следствием смещения ядра факела. Анализ экспериментальных данных, представленных в работе [7], показал, что при увеличении диаметра частиц смещается местоположение ядра факела, повышается протяженность зоны максимальных температур. При этом температура факела при сжигании более крупных частиц возрастает медленнее. Например, разность температур факела тонкой и грубой пыли в сечении $x/D_a = 0,8$ составляет 300°C . Затягивание воспламенения, смещение и растянутость ядра факела при угрублении помола приводят к увеличению температуры в конце факела, причем разница в температуре газов на выходе из модельной топки составляет $50\text{--}80^\circ\text{C}$ [7]. Это соответствует результатам проведенного численного моделирования.

При горении пылеугольного факела угольных частиц с $d = 60$ мкм ядро факела смещается к центру топочного пространства в этом сечении камеры, а область высоких температур ($T = 1395\text{--}1800^\circ\text{C}$) сужается к центру симметрии топочной камеры. Средняя температура в данном случае возрастает до $1258,7^\circ\text{C}$, в то вре-

мя как средняя температура в этом же сечении для угольной пыли с диаметром твердых частиц $d = 90$ мкм равна $1191,5^\circ\text{C}$. Следовательно, горение мелких частиц происходит более интенсивно и с большим локальным выделением тепла.

На рис. 2 представлено распределение концентрации оксида углерода CO (кг/кг) по высоте камеры сгорания для двух исследуемых пылегазовых потоков. Видно, что максимумы концентрации угарного газа (CO) наблюдаются в центре топочной камеры, в области, где имеет место основное газообразование. По мере приближения к выходу оксида углерода CO реагирует с кислородом и происходит догорание до диоксида углерода CO_2 , причем в случае угольных частиц большего диаметра этот процесс идет менее интенсивно. В том и другом случае значения концентрации CO на выходе из топочного пространства существенно уменьшаются для двух исследуемых случаев.

Видно, что с уменьшением диаметра угольных частиц в центре топочной камеры увеличивается интенсивность образования CO. Однако по мере приближения к выходу концентрация CO уменьшается в сравнении со случаем горения более крупных частиц. Этот факт свидетельствует о положительном влиянии измельчения угольной пыли, так как уменьшение угарного газа на выходе из камеры сгорания является одной из экологических задач, стоящих сегодня перед энергетикой.

Распределение концентрации диоксида углерода CO_2 (рис. 3) по высоте топочной камеры

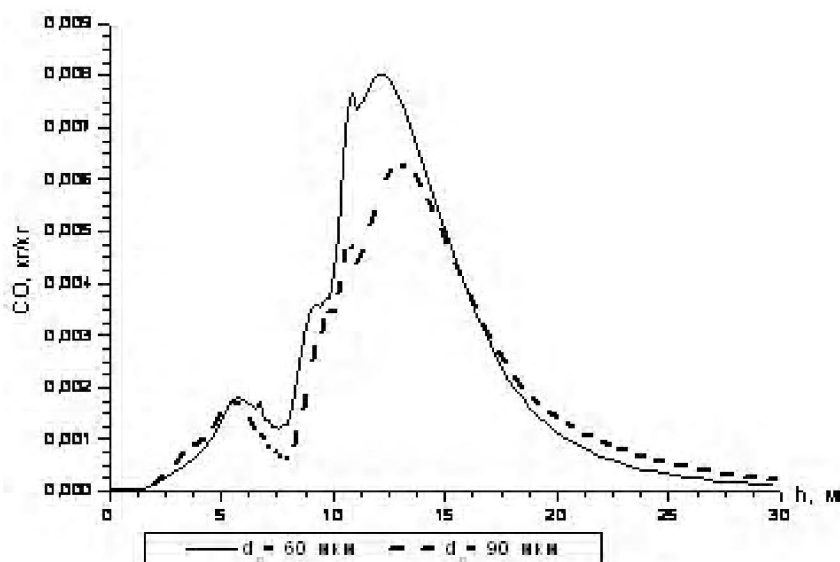
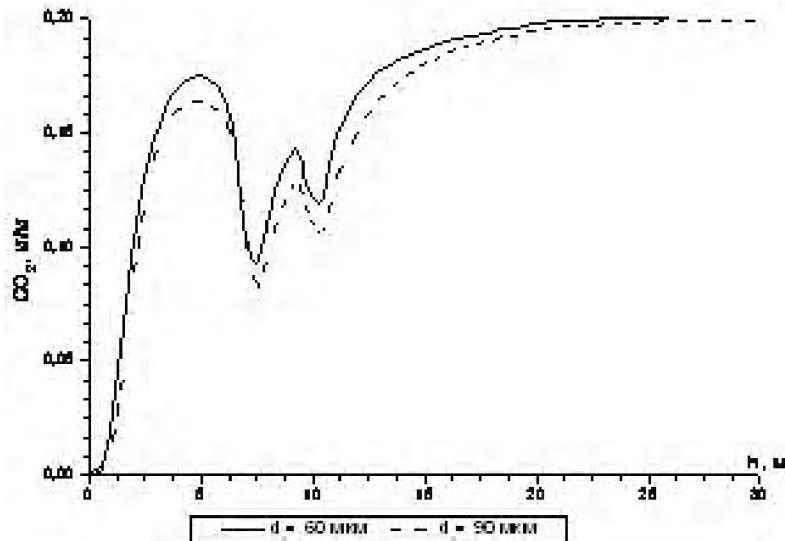


Рис. 2. Сравнительный анализ распределения концентрации оксида углерода CO по высоте топочной камеры для $d_p = 60$ мкм и $d_p = 90$ мкм

Рис. 3. Сравнительный анализ распределения концентрации диоксида углерода CO_2 по высоте топочной камеры для $d_p = 60$ мкм и $d_p = 90$ мкм



существенно отличается от распределения оксида углерода CO . Сравнение результатов численного эксперимента для двух случаев говорит о том, что основное образование CO_2 при горении пылеугольных потоков с диаметрами частиц 60 и 90 мкм наблюдается в области расположения горелок, т.е. там, где находится максимальное количество топлива и окислителя.

Концентрация CO_2 уменьшается в области горелок, а затем продолжает возрастать. Это находится в соответствии с распределением CO . Различие концентраций CO_2 на выходе при горении частиц с различным диаметром практически незаметно. Тем не менее при сжигании угольной пыли с меньшим диаметром концентрация CO_2 больше. Это говорит о том, что в этом случае большая часть CO догорает до CO_2 .

В результате проведенного вычислительного эксперимента по сжиганию экибастузского угля в пылевидном состоянии в топочном пространстве на примере парового котла ПК-39 Ермаковской ГРЭС получено распределение основных характеристик процесса турбулентного горения пылеугольного факела (T , CO , CO_2). Результаты позволяют оценить влияние размера угольных частиц на воспламенение, интенсивность горения пылеугольного факела и образование вредных пылегазовых выбросов в атмосферу, а также дать рекомендации по разработке новых максимально выгодных методов организации топочного процесса сжигания угля для повышения эффективности энергетических объектов и уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leithner R., Muller H., Heitmuller R.J. Dreidimensionale Simulation von Dampferzeugerbrennkammern einschließlich der NO_x -Schadstoffkinetik. Vortrag, VGB-Fachtagung Dampfkessel und Dampfkesselbetrieb 1993, 11.02.93 Essen, 25.02.93 Nürnberg.
2. Weber K. Dreidimensionale Simulation der Gas-Feststoff-Stromung in kohlegefeuerten Dampferzeugern // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, Dusseldorf, Reihe 6. 1999. N 415. S. 198.
3. De Marco A.G., Lockwood F.C. A New Flux Model for the Calculation of Radiation in Furnaces. 1975. P. 184-196.
4. Zinser W. Zur Entwicklung mathematischer Flammenmodelle für die Verbrennung technischer Brennstoffe // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, Dusseldorf, Reihe 6. 1984. N 171. S. 191.
5. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Известия АН СССР. 1942. №6(1). С. 56-66.
6. Аскарлова А.С., Мажренова Н.Р. Экологические проблемы топливно-энергетической отрасли Казахстана и нетрадиционные пути их решения // Алматы: Казак университеті, 1997. 202 с.

Резюме

Әр түрлі диаметрлі бөлшектердің (60 және 90 мкм) бірдисперсті шаңтозаңды жану алауы кезіндегі өнім реакцияларының газтәрізді концентрациясы мен (CO , CO_2) температураларының таралуында әсер ететін ағыс тасымалының 3 өлшемді теңдеуін шешкендегі жану үрдісінің өріс сипаттамалары алынды. Есептелген тәжірибелердің нәтижелеріне салыстырмалы талдау жүргізілді.

Summary

The fields of main characteristics of combustion process in the form of distributions of temperature and concentrations of gaseous chemical reaction products (CO , CO_2) during the combustion of the monodispersed coal dust torch for various coal-dust diameters of particles (60 and 90 micron) were obtained on the basis of the solution for the three-dimensional transport equations in the reactive flows. The comparative analysis of the results of the computational experiments was carried out.

КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 18.10.05г.