

УДК 532.517.4

П.Б. УСТИМЕНКО, Н.Б. НАГИБИНА

АЭРОДИНАМИКА И ГОРЕНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА В КОЛЬЦЕВОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

Развита математическая модель и выполнен численный расчет аэродинамики и горения диффузионного турбулентного пылеугольного факела в кольцевой топочной камере. В расчетах использовались уравнения сохранения основных динамических и тепловых характеристик процесса, осредненные по Фавру-Марковину, $k-\epsilon$ модель турбулентности и приближенная схема горения. Впервые получены распределения компонент вектора скорости, статического давления, температуры, концентрации оксидов азота, углерода и летучих компонентов угля.

1. Введение. Строительство крупных тепловых электростанций с энергоблоками 500–800 Мвт и выше связано с трудностями по созданию мощных котлоагрегатов, особенно пылеугольных. Для обеспечения высокой надежности и экономичности современного котлоагрегата принимаются умеренные теплонапряжения и сравнительно низкие температуры газов в топочной камере, что при существующих традиционных конструкциях топочных устройств приводит к большим размерам всего котлоагрегата. Так, высота котла типа П-67 для блока 800 Мвт, работающего на канко-ачинских углях, превышает 100 м, а для его установки требуется здание высотой 120 м. Строительство таких зданий и монтаж крупновысотных котлов является чрезвычайно сложной технической задачей, в результате сроки и стоимость строительства современных мощных тепловых электростанций существенно увеличиваются. В связи с этим в последние годы особенно остро встал вопрос о поисках новых технических решений по снижению габаритов крупных котлоагрегатов, в частности пылеугольных.

В свете этой проблемы Сибтехэнерго с участием КазНИИЭ, ВТИ, СКБ ВТИ и ТЭПа разработана и предложена принципиально новая конструкция котлоагрегата с кольцевой топкой [1]. Анализ конструкций современных мощных котлоагрегатов показал, что большие габариты его и, прежде всего, высота, как правило, определяются размерами топочной камеры. Отметим, что если для котлов средней производительности (например, до 320 т/ч) высота пылеугольной топки зависит от условий выгорания топлива и тепловосприятия экранных поверхностей, то на

мощных котлах она выбирается в основном из условий охлаждения продуктов сгорания в пределах топки до температуры, обеспечивающей надежную и бесшлаковую работу ширмовых и конвективных поверхностей нагрева. В результате высота топки современного крупного котлоагрегата оказывается значительно большей, чем требуется для экономичного выгорания топлива.

В существующих конструкциях котлов тепловоспринимающие поверхности в топке размещаются в основном в виде настенных экранов. Использование же объема топки для установки двухсветных экранов и низкоопущенных ширм широкого распространения не получило из-за их недостаточной надежности, особенно при большой глубине топки.

Кольцевая топочная камера, по существу, представляет дальнейшее развитие тангенциальных топок, отличительной особенностью которых является вихревой характер течения газов. Продукты сгорания в такой камере движутся сравнительно узким спирально-вихревым потоком в пристенной области топки. В центральной (приосевой) области топочной камеры по всей ее высоте практически отсутствует активное движение факела. По данным модельных и натурных исследований, поперечный размер (диаметр) этой малоактивной зоны достигает 40–50 % сечения топки. Отсутствие в этой области активного движения факела позволяет эффективно использовать ее для размещения надежно работающих дополнительных в виде сплошной вставки поверхностей нагрева. При таком решении врашающийся факел оказывается как бы зажатым в кольцевом пространстве между внутренними и

наружными экранами, в результате чего условия смешения, выгорания и теплообмена в таком топочном объеме становятся существенно отличными от обычных топок.

Выполненные Сибтехэнерго и СКБ ВТИ проектно-конструкторские проработки профилей котлов для блоков 500 и 800 МВт на Экибастузских и Канско-Ачинских углях показали, что применение кольцевых топок для мощных котлоагрегатов позволяет снизить их высоту на 30-40 % и за счет этого существенно сократить металлоконструкцию и стоимость строительства станции.

В статье рассмотрены аэродинамика и горение закрученного турбулентного диффузионного пылеугольного факела в кольцевой топочной камере. Расчет этого весьма сложного пространственного (трехмерного) вращающегося турбулентного течения с химическими реакциями горения опирается на принципы и методы математического моделирования процесса турбулентного переноса и химической кинетики горения. Уравнения сохранения массы, количества движения, кинетической энергии пульсационного движения, диссипации и др. горящей пылеугольной смеси в поле центробежных сил осредняются по Фавру-Марковину и дополняются $k - \varepsilon$ моделью турбулентности и приближенной моделью химического реагирования.

Численное моделирование было выполнено с использованием программного комплекса Cinar ICE CFD [2, 3], созданного для решения задач в области горения топлив, механики жидкости и газа в промышленных устройствах. Программный комплекс базируется на решении уравнений Навье-Стокса. Приняты $k - \varepsilon$ модель турбулентности и физико-химические модели для расчета выделения летучих угля, горения коксового остатка и газа.

В результате численного анализа полученной системы уравнений впервые получены профили компонент вектора скорости, статического давления, температуры, а также концентраций окислов азота, углерода и смеси летучих горючего топлива в различных сечениях по длине кольцевой топочной камеры.

2. Основные уравнения и гипотезы замыкания. Трехмерное пространственное течение будем описывать в декартовой системе координат. Осредненные по Фавру уравнения сохранения массы, моментов, энталпии, турбулентной кинетической энергии, диссипации и др. в обобщенной форме запишутся в виде:

$$\frac{\partial(\langle \rho \rangle \tilde{u}_j F)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (G_{i,F} \frac{\partial F}{\partial x_j}) + \langle S_{g,F} \rangle , \quad (1)$$

где $\langle \rho \rangle$ – осредненная по времени плотность смеси, \tilde{u}_j – осредненная по Фавру декартовая компонента вектора скорости, $G_{i,F}$ – эффективный турбулентный коэффициент переноса для величины F , $\langle S_{g,F} \rangle$ – газофазный источниковый член. Выражения для F , $G_{i,F}$ и $S_{g,F}$ представлены в таблице для всех уравнений сохранения.

В таблице μ_i – эффективный коэффициент вязкости, представляющий собой сумму коэффициентов молекулярной μ и турбулентной μ_t вязкости. σ_F – эффективное число Прандтля-Шмидта для величины F . Турбулентная вязкость принимается равной $\mu_t = C_\mu \langle \rho \rangle \tilde{k}^2 / \varepsilon$, а генерация (производство) турбулентной энергии выражается как $G = \mu_t (\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$. Константы, используемые в $k - \varepsilon$ модели турбулентности, принимают обычные значения [4]: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$.

Уравнение	F	$G_{i,F}$	$\langle S_{g,F} \rangle$
mass	1	0	0
моментов	\tilde{u}_i	$\mu_i = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_i \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_i \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k})$
энталпии	$\tilde{k} \tilde{h}$	μ_i / σ_h	S_{RAD}
Турбулентной кинетической энергии	\tilde{k}	μ_i / σ_k	$G - \langle \rho \rangle \varepsilon$
Диссипации турбулентной энергии	ε	$\mu_i / \sigma_\varepsilon$	$C_1 \frac{\varepsilon}{\tilde{k}} G - C_2 \langle \rho \rangle \frac{\varepsilon^2}{\tilde{k}}$
Фракции примеси	\tilde{f}_i	μ_i / σ_f	0

Для замыкания уравнений сохранения используется предположение о градиентном характере турбулентного переноса. Для плотности потока скалярной величины q это означает, что

$$\langle \rho u_i'' q'' \rangle = -\langle \rho \rangle \mu_i \frac{\partial q}{\partial x_i}, \text{ в то время как для}$$

компоненты векторной величины u , плотность потока представляется в виде

$\langle \rho u_i'' u_j'' \rangle = -\langle \rho \rangle \mu_i \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$. Входные условия для турбулентных величин предполагаются следующими: для кинетической энергии турбулентности на входе $\tilde{k}_N = C_k (\bar{u}_{in})^2$, для диссипации турбулентной энергии $\tilde{\varepsilon}_N = C_\mu \frac{\tilde{k}_N^{1.5}}{L}$, где \tilde{u}_N – компонента в входной скорости нормальная к границе, C_k и C_μ – эмпирические константы, имеющие порядок 0.02-0.1, L – характерная для турбулентной структуры длина. Для описания движения твердых частиц топлива, относительно которых предполагается, что они имеют сферическую форму, используется уравнение:

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = -\alpha(u_{p,i} + u_{d,i} - \tilde{u}_i) \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{18C_p(\text{Re}_p/24)}{\rho_p d_p^2}$, $u_{p,i}, u_{d,i}$ – соответственно скорость частицы и поправка, учитывающая эффект воздействия турбулентности на скорость частицы. $u_{d,i} = C_1 (\overline{|u_i''|^2})^{1/2}$, $\overline{|u_i''|^2} = -\frac{2\mu_i}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \tilde{k}$, C_1 – эмпирическая константа, C_p – коэффициент, являющийся функцией числа Рейнольдса

$$\text{Re}_p = \frac{\langle \rho \rangle |\tilde{u}_i - u_{p,i}| d_p}{\mu}, C_p = \frac{1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}}{\text{Re}_p / 24}.$$

Уравнение баланса энергии горящей частицы твердого топлива записывается как

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_b + Q_c + Q_r + L_p \frac{dm_{p,dv}}{dt}, \quad (3)$$

где c_p – теплоемкость частицы, L_p – скрытая теплота выделения летучих, $\frac{dm_{p,dv}}{dt}$ – изменение массы частицы только за счет процесса выделения летучих.

Тепло, полученное от горения, рассчитывается как $Q_b = \eta H_c (-\frac{dm_{p,c}}{dt})$, где $\frac{dm_{p,c}}{dt}$ – изменение массы частицы за счет горения, H_c – теп-

лотворная способность топлива, η – коэффициент, учитывающий тепло, поглощенное частицей.

Конвективная теплопередача к частице определяется как $Q_c = \pi d_p N u k_g (\bar{T} - T_p)$. Здесь \bar{T} – средняя температура газа, $k_g(\bar{T})$ – теплопроводность газа, Nu – число Нуссельта, вычисляемое по формуле $Nu = 2.0 + 0.6 \text{Re}_p^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$. Тепло, переданное радиацией, рассчитывается по формуле $Q_r = \pi \sigma \epsilon_p d_p^2 (T_g^4 - T_p^4)$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ϵ_p – параметр эмиссии частицы, T_g – температура радиации, определяемая в соответствии с принятой моделью радиации.

Изменение массы частицы топлива за счет горения определяется по уравнению

$$\frac{dm_{p,c}}{dt} = -k_r \pi d_p^2 p X_{O_2}, \quad (4)$$

где X_{O_2} – молярная фракция O_2 в газе, окружающем частицу. Процесс горения пылеугольного факела определяется кинетикой химической реакции и диффузией окислителя к поверхности частицы. Скорость реакции горения при этом может быть выражена в виде [5]:

$$k_r = \frac{1}{\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_d}},$$

где k_c – скорость химической реакции углеводорода, k_d – скорость реакции, связанная с диффузией кислорода. Они даются следующими выражениями:

$$k_c = A_c \exp(-\frac{E_c}{RT}), k_d = \frac{\frac{D_c W_c}{4}}{\frac{d_p}{2} \frac{T_p + \bar{T}}{4}},$$

где $D_c = D_0 \frac{p_0}{p} (\frac{\bar{T}}{T_0})^{1.75}$, D_0 – коэффициент двойной

диффузии для смеси $O_2 - N_2$, W_c – молярная масса углерода. Давление p_0 и температура T_0 находятся в области значений $p_0 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 400 \text{ K}$. Одним из основных компонентов вредных выбросов, возникающих при горении органических топлив, являются оксиды азота NO. Образование оксидов азота зависит от количества азота, содержащегося в топливе, от температуры горения и стехиометрических условий. Таким образом, NO производятся как топливные NO, термические NO и быстрые NO. Производство про-

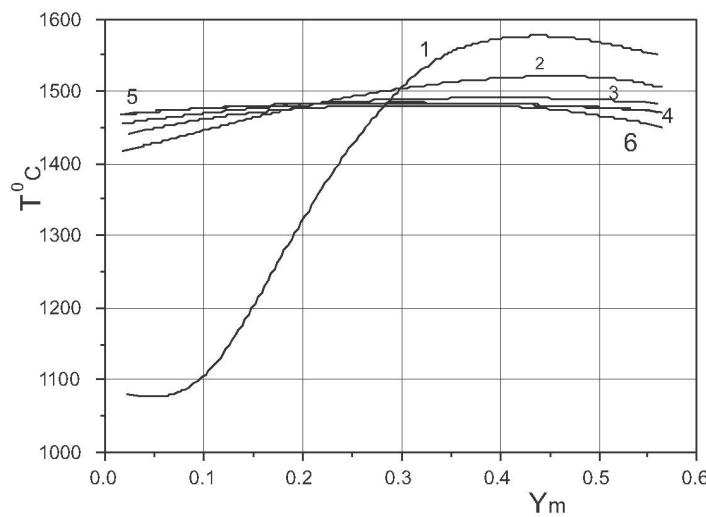


Рис.1. Профили температуры в поперечных сечениях пылеугольного факела по длине кольцевой топки. 1- $z=0.25$ м, 2- $z=0.41$ м, 3- $z=1.19$ м, 4- $z=3.19$ м, 5- $z=4.39$ м, 6- $z=5.21$ м

мышленным пылеугольным пламенем топливных оксидов азота хорошо описывается простой кинетической моделью Soete's [6]. Топливный азот быстро трансформируется в HCN. Далее реализуются два альтернативных пути: реакция окисления до NO или рекомбинация NO в форму N_2 . Образование HCN принимается пропорциональным содержанию азота в топливе

$$r_1 = \chi S_{vol} w_{HCN} / W_N. \quad (5)$$

При этом производство N_2 и NO выражается в форме Аррениуса как:

$$r_2 = \frac{p}{10^3 W_{mix}} A_2 \exp(-E_2/RT) X_{HCN} X_{NO}, \quad (6)$$

$$r_3 = \frac{p}{10^3 W_{mix}} A_3 \exp(-E_3/RT) X_{HCN} X_{O_2}. \quad (7)$$

Здесь S_{vol} представляет величину реализованных летучих, w_N – количество азота, содержащегося в топливе, W_N – молекулярную массу, χ – эмпирический коэффициент и X – отдельные молярные фракции. Область констант в (8) и (9) дана в работе [6].

Транспортные уравнения для величины HCN и NO записутся в виде:

$$\frac{d(HCN)}{dt} = r_1 - r_2 - r_3, \quad (8)$$

$$\frac{d(NO)}{dt} = r_3 - r_2. \quad (9)$$

Источником термических NO является окисление молекулярного азота при горении в

воздухе. Вследствие высокой энергии активации этого процесса термические NO возникают только при высоких температурах. Термические NO моделируются посредством известного механизма Зельдовича и могут быть представлены следующим выражением:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2[O] \frac{k_9 k_{10} [O_2] [N_2] - k_{-9} k_{-10} [NO]^2}{k_{10} [O_2] + k_{-9} [NO]},$$

$$[O] = \frac{k_p}{(RT)^{1/2}} [O_2]^{1/2}, \quad (10)$$

где [] обозначают молярные концентрации веществ, а коэффициенты k_i представлены в работе [8].

Быстрые окислы азота производятся в соответствии с механизмом, предложенным в работе [6], посредством воздействия фрагментов углеводорода на молекулярный азот в зоне пламени:

$$\frac{d[NO]}{dt} = f_c \left(\frac{RT}{p}\right)^{1+z} k_{pr} [O_2]^z [N_2] [F_u], \quad (11)$$

где k_{pr} – степень реакции, выраженная в Аррениусовой форме, $[F_u]$ – концентрация топлива. Порядок реакции $z = 0.5$. Корректирующий фактор f_c для учета влияния натурального топлива и стехиометрии представлен в работе [9].

3. Результаты расчетов. Рассмотрим турбулентный диффузионный пылеугольный факел в кольцевой топочной камере. Длина кольцевой топки была равна 5.4 м, а расстояние между противоположными гранями составляло 2.4 м. Че-

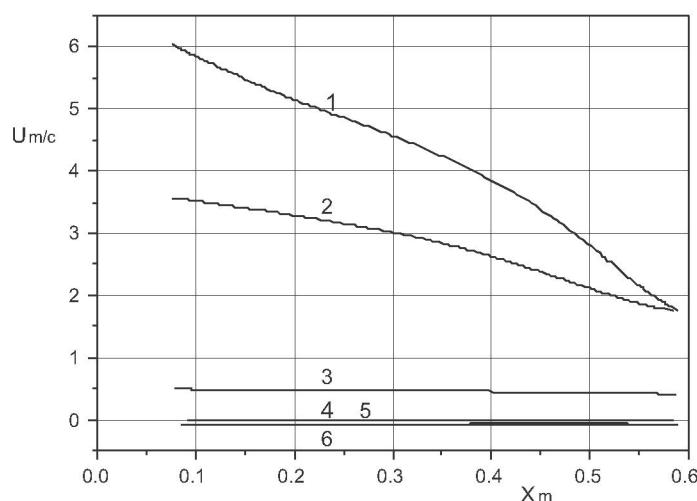


Рис.2. Профили поперечной скорости U_m/c (при $y=1.2m$) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

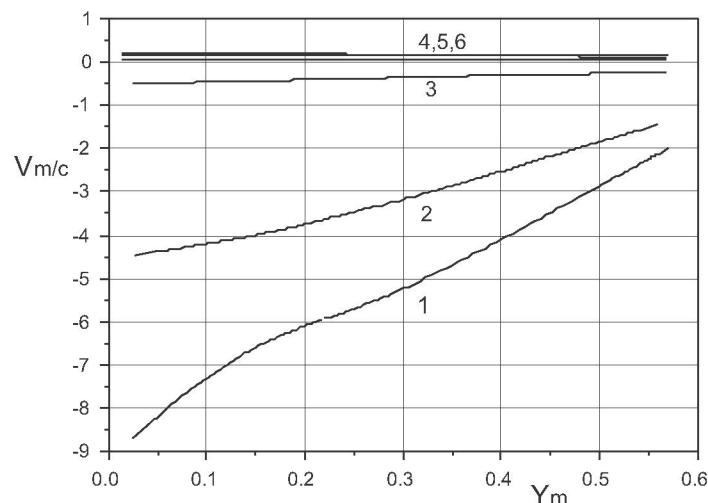


Рис.3. Профили поперечной скорости V_m/c (при $x=1.2m$) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

четыре выходных сопла из камеры имели квадратное сечение с размерами 0.54×0.54 м. Сопла для пылеугольной смеси и воздуха были расположены на четырех направленах друг против друга гранях, имели одинаковое квадратное сечение и соответственно поперечные размеры 0.08×0.08 м и 0.16×0.16 м. Скорость пылеугольной смеси на выходе из каждого сопла была 5 м/с и расход твердого топлива (угля) – 0.033 кг/с. Тангенциальная компонента скорости в соплах для воздуха составляла 10 м/с и нормальная к плоскости выхода из сопла 10 м/с. Начальная температура воздуха и угля на выходе из сопел была 290 °С. Сжигался экибастузский уголь с зольностью 42 %. Аэродинами-

ка и горение пылеугольного факела в кольцевой топке носит сложный пространственный (трехмерный) характер. В связи с этим для иллюстрации на рисунках будут представлены осредненные характеристики процесса в центральном поперечном сечении факела (при фиксированных значениях $x=1.2$ м или $y=1.2$ м) в различных сечениях по его длине.

На рис. 1 изображены профили температуры в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела. С удалением от входного сечения температура выравнивается по сечению топки и принимает примерно постоянное значение, практически совпадающее с полученным на экспериментальном стенде [1].

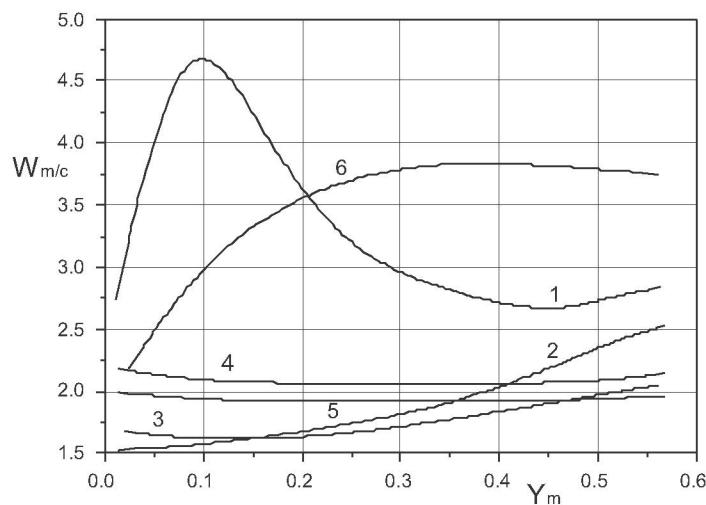


Рис.4. Профили продольной скорости W_m/c (при $x=1,2\text{м}$) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

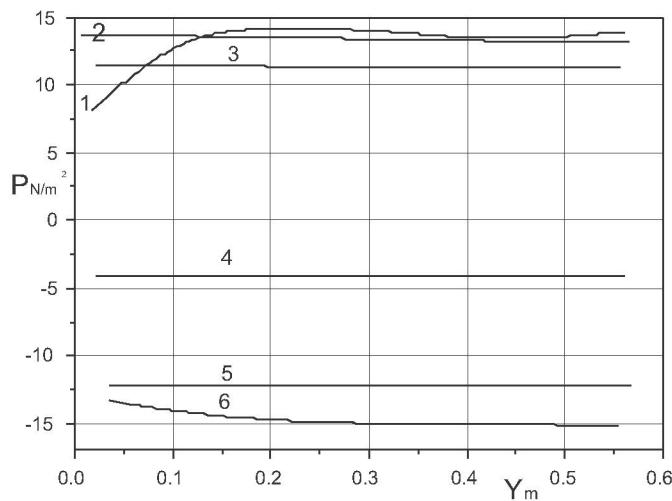


Рис.5. Профили статического давления (при $y=1\text{м}$) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

Профиля поперечной скорости U_m/c при $y = 1,2 \text{ м}$ представлены на рис. 2. Поперечная скорость принимает максимальные значения у внешней стенки камеры и постепенно уменьшается при приближении к внутренней вставке. С удалением от входного сечения абсолютная величина поперечной скорости уменьшается и при $z=3 \text{ м}$ принимает примерно постоянное значение по всему сечению близкое к нулю. Профили поперечной скорости V_m/c при $x = 1,2 \text{ м}$ представлены на рис. 3. Поперечная скорость V , как и U , принимает максимальные значения у внешней стенки камеры и постепенно уменьшается при приближении к внутренней вставке. С удалением от входного сечения абсолютная величина попереч-

ной скорости также уменьшается и при $z = 3 \text{ м}$ принимает примерно постоянное значение по всему сечению близкое к нулю. Вид профилей U и V свидетельствует о наличии заметного вращательного движения пылевоздушного потока в кольцевой камере.

Распределение продольной скорости W_m/c в поперечных сечениях диффузионного пылеугольного факела в кольцевой топке представлено на рис. 4. Как видно из рисунка, с удалением от входного сечения происходит постоянная перестройка продольной скорости, и начиная с расстояния $z = 1.19 \text{ м}$ она выравнивается по сечению топки и принимает примерно постоянное значение.

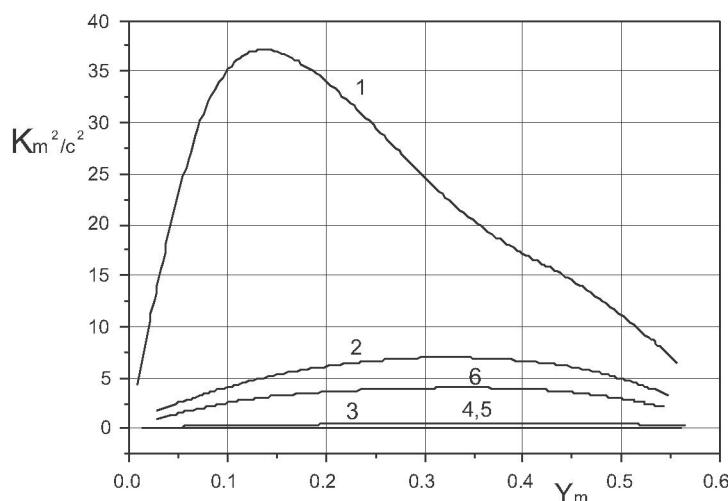


Рис. 6. Профили кинетической энергии пульсационного движения в поперечных сечениях кольцевой топки. Обозначения кривых как на рис.1

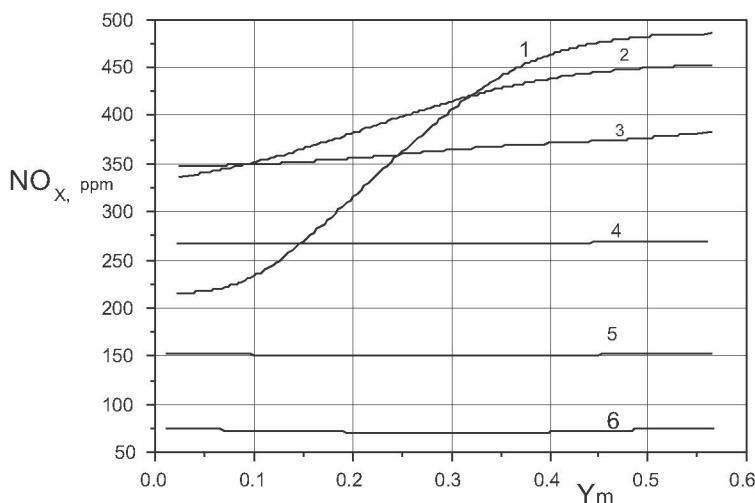


Рис. 7. Профили окислов азота NO_x (при $x=1.2\text{м}$) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

С профилями скорости U и V , описывающими движение пылегазового факела в кольцевой камере, полностью согласуется распределение статического давления $P[\text{N/m}^3]$, представленное на рис. 5.

На рис. 6 представлено распределение кинетической энергии пульсационного движения в кольцевой топке при горении пылеугольного факела. Максимальные значения турбулентной энергии имеют место в начальных сечениях топки вблизи горелочных устройств. Вдали от них она быстро уменьшается и начиная с расстояния примерно равного $z=1\text{m}$ становится близкой к нулю.

На рис. 7 представлены профили оксидов азота $\text{NO}_x[\text{ppm}]$ в кольцевой топке при сжигании

пылеугольного топлива. Как видно из рисунка, уровень выхода оксидов азота не превышает 500 ppm, что связано, по-видимому, с не очень высоким уровнем температуры, достигнутым в кольцевой топке (не превышает 1600°C) и особенностями аэродинамики и горения криволинейного турбулентного диффузионного факела. Расчетный уровень выхода оксидов азота по порядку величины совпадает с полученным на экспериментальном стенде [1].

Выход летучих углей в различных поперечных сечениях по длине пылеугольного факела и концентрация несгоревшего углерода показаны на рис. 8. Концентрация летучих углей в основной области кольцевой топки достигает примерно 0.018 кг/кг и уменьшается с удалением от вход-

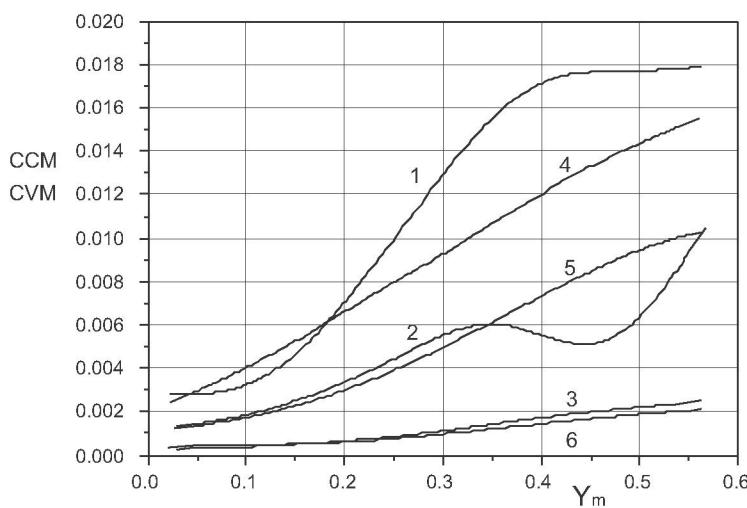


Рис. 8. Профили концентрации летучих угля (кривые 4,5,6) и углерода (кривые 1,2,3) в поперечных сечениях по длине пылеугольного факела в кольцевой топке. Обозначения кривых как на рис.1

ных сопел. Концентрация несгоревшего углерода также уменьшается с удалением от входного сечения и достигает значения 0.002 кг/кг вблизи выхода из кольцевой топки.

Таким образом, выполненный теоретический анализ и расчет аэродинамики и горения турбулентного диффузионного пылеугольного факела в многогранной кольцевой топочной камере позволил впервые получить детальную пространственную (трехмерную) структуру факела. При этом были получены подробные распределения компонент вектора скорости, статического давления, температуры, концентрации оксидов азота, углерода и летучих углей в различных сечениях по длине кольцевой топки. Отмечено наличие заметного вращательного движения в зазоре между внешней стенкой камеры и внутренней вставкой, интенсифицирующего процессы турбулентного переноса в топке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серант Ф.А., Устименко Б.П., Змейков В.Н., Кроль В.О. Кольцевые топки пылеугольных котлов. Алма-Ата, Наука, 1988, с. 168.

2. Янкоски Ф.К., Локвуд Б.Е..Мессерле Б.Е., Карпенко Е.И., Устименко А.Б. Моделирование плазменной подготовки угольной пыли к сжиганию. Теплофизика и аэромеханика, 11(3), 2004, с. 473-486.

3. Lockwood F.C., Mahmud T., Yehia M.A. Simulation of pulverized coal test furnace performance Fuel. 77(12), 1998, p.1329.

4. Устименко Б.П. Аэродинамика и горение турбулентного диффузионного пылеугольного факела плоскофакельной топочной горелки. Горение и плазмохимия, 2008. т. N , с.

5. Lockwood F.C., Soloja A.P. and Syed S.A. A Prediction Method for Coal Fired Furnaces. Combust. and Flame, 1980, 38, p.1.

6. De Soete G.G. Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen. 15th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, 1975, p.1093.

7. Bowman C.T. Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion. Progr. Energy Combust., 1975, Sci., 1, p.33.

8. Hanson R.K. and Salimian S. Survey of Rate Constant in H/N/O System. Combustion Chemistry. W.C. Gardiner (ed), 1984, p.361.

9. Missaghi M, Pourkashian M, Williaams A. and Yap L. The prediction of NO Emissions from an Industrial Burner. 2nd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 1991, Vilamoura, Portugal.

Резюме

Математикалық модель дамытылған және айналмалы от жағатын камерада диффузиялық турбуленттік тозаң көмір алауының жануының және аэродинамикасының сандық есептеуі орындалған. Есептеулер процестің Favre-Марковин бойынша орташаланған негізі динамикалық және жылу сипаттамаларын сақтау тендеулері, k – е турбуленттік моделі және жанудың жуық схемасы пайдаланылды.

Summary

Mathematical model was developed and computation was fulfilled for aerodynamics and combustion of a swirling diffusive turbulent pulverized coal flame in a ring-shaped furnace. Favre-Morkovin averaged questions for conservation of the main dynamic and thermal indexes of the process, k – e turbulence model and approximate combustion scheme were applied. Distributions of the components of velocity vector, statistic pressure, temperature, nitrogen oxides concentration, coal volatiles, and unburned carbon were found for the first time.

Поступила 20.10.09 г.