

## Заключение

Программно-математическое обеспечение котельной технологии ЦКС обеспечивает возможность расчёта таких технических процессов: теплового аэродинамического выгорания и образования токсичных выбросов и др.

Разработанные математические модели, адаптированные физическим экспериментом, служат необходимой базой выбора режимных и конструктивных параметров парогенераторов ЦКС, ориентированных на сжигание местных низкорекреационных, высокозольных, с повышенным содержанием влаги и серы твёрдых топлив

Данная работа выполнена при поддержке гранта МинВУЗа РФ по энергетике ТОО-1.2-3045.

УДК 662.61:519.001.57

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

А.В. Старченко\*, С.В. Красильников\*\*

\* - Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: [starch@ctc.tsu.ru](mailto:starch@ctc.tsu.ru)

\*\* - Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: [sergev@tped.tpu.ru](mailto:sergev@tped.tpu.ru)

В настоящее время при проектировании топок котельных агрегатов, работающих на пылевидном угольном топливе, перспективным является использование методов математического моделирования [1, 2]. Такой подход позволяет рассматривать объект в реальном масштабе, в короткие сроки изменять геометрию топки, характеристики топлива, ориентацию действия горелочных струи и их параметров, оперативно производить оценку влияния сделанных изменений на эффективность работы основного звена энергетического оборудования.

Целью данной работы является построение и апробация пространственной математической модели аэродинамики, тепло- и массопереноса, горения полидисперсного угольного топлива в камерах сгорания котлоагрегатов.

При выводе определяющих уравнений математической модели рассматриваемого явления предполагается, что процесс стационарный, теплофизические свойства газовой фазы зависят от концентрации компонентов ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , летучие) и температуры. Поступающие в топку частицы угля не содержат влаги, и поведение всего ансамбля полидисперсных частиц можно описать поведением нескольких фракций с частицами одинаковых размеров. Двигаясь по топочному пространству, частицы нагреваются за счет конвективного и радиационного теплообмена. После достижения порогового значения температуры начинается выход летучих и гомогенное горение их реагирующих компонентов. Затем происходит догорание коксового остатка, результатом которого могут быть  $CO$  и  $CO_2$ . Соотношение этих компонентов в продуктах реакции

горения углерода зависит от температуры частиц. Среди газофазных реакций учитывается реакция горения угарного газа.

В этом случае математическая модель включает:

Газовая фаза

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{vap} + J_{char}; \quad (1)$$

Уравнения баланса массы газовых компонентов

$$\frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta_{vol} J_{vol} - \beta_{CO} J_{CO} - \beta_{char} J_{char}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_{vol} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i} \right) + \alpha_{vap} J_{vap} - J_{vol}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i} \right) + f_{CO} (1 + \beta_{char}) J_{char} - J_{CO}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x_i} \right) + (1 - f_{CO}) (1 + \beta_{char}) J_{char} + (1 + \beta_{CO}) J_{CO}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=N_2, O_2, vol, CO, CO_2, H_2O} C_j = 1, \quad (C_{N_2} + C_{O_2} + C_{vol} + C_{CO} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1); \quad (7)$$

Уравнения движения

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right] + \rho g_j + F_j; \quad j = 1, 2, 3, \quad (8)$$

Уравнение энергии

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_t} \right) c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta; \quad (9)$$

Уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[ \frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}; \quad (10)$$

Дисперсная фаза

Для моделирования движения частиц используется лагранжев подход [3, 4, 5], суть которого заключается в следующем. Весь спектр частиц пылеугольного топлива, поступающего в топочную камеру, разбивается на N групп. Разбиение осуществляется по размерам на основе зависимости Розина – Раммлера или вручную на основе данных экспериментального анализа фракций после обработки угля мельницами. При этом считается, что поведение каждой группы частиц может быть охарактеризовано

поведением ее представителя – пробной одиночной частицы. Т. е. свойства, которыми в настоящий момент времени обладает частица-маркер, распространяются на все частицы группы, которую представляет частица-маркер. Для расчета параметров, характеризующих состояние частицы-маркера, используется следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

Уравнения движения частицы-маркера  $i$  – ой группы,

$$\frac{d\tilde{U}_j^i}{dt} = \frac{\tilde{U}_j - \tilde{U}_j^i}{\tau_i} + g_j; j=1,2,3, \quad (11)$$

$$\tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3c_{D_i} \rho |\tilde{U}^i - \tilde{U}|}; c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{Re_i} (1 + 0,15 Re_i^{0,687}), & Re_i \leq 1000; \\ 0,44; & Re_i > 1000; \end{cases}$$

$$Re_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\tilde{U}_j^i - \tilde{U}_j)^2} d_{pi}}{\mu}$$

где  $\tilde{U}_j^i$  - компоненты скорости частиц;  $\tilde{U}_j = U_j + U_j'$  - компоненты скорости газа;  $\rho_p$  - плотность угля;  $d_{pi}$  - размер частиц  $i$  – ой группы;  $c_{D_i}$  - коэффициент сопротивления частиц;  $\tau_i$  - время их релаксации; турбулентные пульсации скорости газа  $U_j'$  выбираются случайным образом на основе принятого нормализованного распределения Гаусса со среднеквадратичным отклонением, равным  $\frac{2}{3}k$ , т.е.  $U_j' = \xi_j \sqrt{\frac{2}{3}k}$ ,  $|\xi_j^2| = 1$ ;  $k$  - энергия турбулентности. Значение  $\xi_j$  изменяется с помощью датчика случайных чисел в процессе движения частицы в исследуемом пространстве через отрезок времени

$$\tau_T = \min \left[ \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3}k}}, \frac{L}{|\tilde{U}^i - \tilde{U}|} \right], \text{ где } L = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} - \text{ масштаб турбулентности.}$$

Компоненты скорости частиц, не отмеченные волной ( $U_j'$ ), являются средними скоростями. Эти и другие параметры пролета частиц-маркеров определяются после получения достаточного количества траекторий из одной точки.

Уравнения тепломассообмена и горения частиц,

$$\frac{dm_i}{dt} = -\dot{M}_i^{vap} - \dot{M}_i^{char}, \quad (12)$$

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = Q_{char} \dot{M}_i^{char} + \pi d_{pi}^2 [\alpha_{conv} (T - T_i) + \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4)] - Q_{vap} \dot{M}_i^{vap}. \quad (13)$$

Здесь  $m_i$  - масса одиночной частицы с диаметром  $d_{pi}$ ;  $c_p$  - теплоемкость угля;  $Q_{char}$  - калорийность кокса;  $Q_{vap}$  - тепло, необходимое для выхода летучих;  $\varepsilon_p$  - степень черноты

частицы;  $\alpha_{conv}$  - коэффициент конвективной теплоотдачи одиночной частицы:

$\frac{\alpha_{conv} d_{pi}}{\lambda} = 2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}$ ;  $\lambda = \mu c / \text{Pr}$  - коэффициент теплопроводности газа.  $T_i$  - температура  $i$ -ой частицы угля.

При определении массовой скорости выхода летучих  $\dot{M}_i^{vap}$  используется соотношение (закон Аррениуса),

$$\dot{M}_i^{vap} = k_{vap} \exp\left(-\frac{E_{vap}}{R_0 T_i}\right) \cdot f_{vo} \cdot m_{oi}, \quad (14)$$

где  $m_{oi}$  - начальная масса сухой частицы с диаметром  $d_{pi}$ ;  $f_{vo}$  - массовая доля летучих в сухом угле;  $k_{vap}$  - предэкспонент;  $E_{vap}$  - энергия активации.

Скорость горения коксового остатка зависит от кинетической скорости химической реакции горения углерода и от интенсивности диффузии окислителя к поверхности частицы [6],

$$\dot{M}_i^{char} = \pi d_{pi}^2 \rho C_{O_2} \frac{K_K K_D}{K_K + K_D}, \quad (15)$$

$$K_K = k_{char} \exp\left(-\frac{E_{char}}{R_0 T_i}\right).$$

Для  $K_D$  используется зависимость Бабия В.И.  $K_D = \frac{2D_{O_2}}{d_{pi}}$ ;  $D_{O_2} = 16 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,9}$ .

#### Влияние дисперсной фазы на газовую

В описанной выше математической модели необходимо определить члены в уравнениях переноса, которые описывают влияние частиц на характеристики несущей среды:  $J_{vap}$ ,  $J_{char}$ ,  $F_j$ ,  $\Theta$ ,  $S_k$ ,  $S_H$ . В использованном здесь смешанном эйлерово-лагранжевом способе моделирования аэродинамики, тепломассообмена и горения в камере сгорания котлоагрегата учет обратного влияния частиц на газовую фазу выполняется следующим образом.

Поскольку решение уравнений будет осуществляться численно, то рекомендуется использовать метод контрольного объема. Согласно этому, область исследования разбивается на конечное число непересекающихся объемов. Значения искомых функций внутри каждого объема могут считаться однородными. При последовательном расчете траекторий движения частиц-представителей каждой группы с учетом изменения их массы, скорости, положения и температуры для каждого контрольного объема вычисляются значения  $J_{vap}$ ,  $J_{char}$ ,  $F_j$ ,  $\Theta$ ,  $S_k$ ,  $S_H$  по следующим формулам.

$$J_{vap} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{vap}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}, \quad (16)$$

$$J_{char} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{char}}{m_{oi}} \dot{m}_{oi}, \quad (17)$$

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{U_j^i - U_j}{\tau_i} \dot{m}_i t_i - \frac{\Delta m_i}{m_{oi}} \dot{m}_{oi} U_j^i \right]; j = 1, 2, 3, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Theta = & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ Q_{char} \Delta m_i^{char} + \bar{m}_i C_p \Delta T_i - Q_{vap} \Delta m_i^{vap} \right] \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} - \\ & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ C_p T_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 \right] \dot{m}_{oi} + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 + \\ & + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\pi d_{pi}^2}{m_{oi}} \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] \dot{m}_{oi} t_i \end{aligned} \quad (19)$$

$$S_k = \frac{2k}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i + T_L}; T_L = \frac{0,41k}{\varepsilon}, \quad (20)$$

$$S_H = \frac{\varepsilon_p}{V} \sum_{i=1}^N \pi d_{pi}^2 (4\sigma T_i^4 - H) \frac{\dot{m}_{oi}}{m_{oi}} t_i. \quad (21)$$

Здесь  $N$  – число частиц-представителей, прошедших через рассматриваемый контрольный объем, имеющий размер  $V$ ;  $\Delta m_i = \Delta m_i^{vap} + \Delta m_i^{char}$  – изменение массы  $i$  – ой частицы в процессе выхода летучих и горения коксового остатка за время прохождения ею данного контрольного объема;  $m_{oi}$  – начальная масса частицы представителя;  $\dot{m}_{oi}$  и  $\dot{m}_i$  – начальный и текущий массовые расходы частиц данной фракции;  $t_i$  – время прохода  $i$  – ой частицы через контрольный объем  $V$ ;  $\bar{m}_i$  – средняя масса  $i$  – ой частицы в контрольном объеме;  $\Delta T_i$  – изменение температуры частицы в контрольном объеме  $V$ .

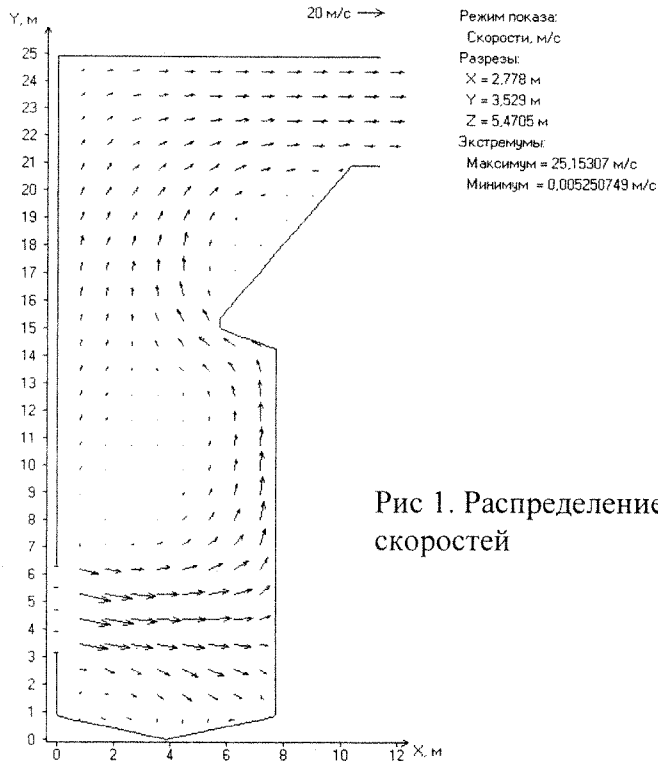


Рис 1. Распределение скоростей

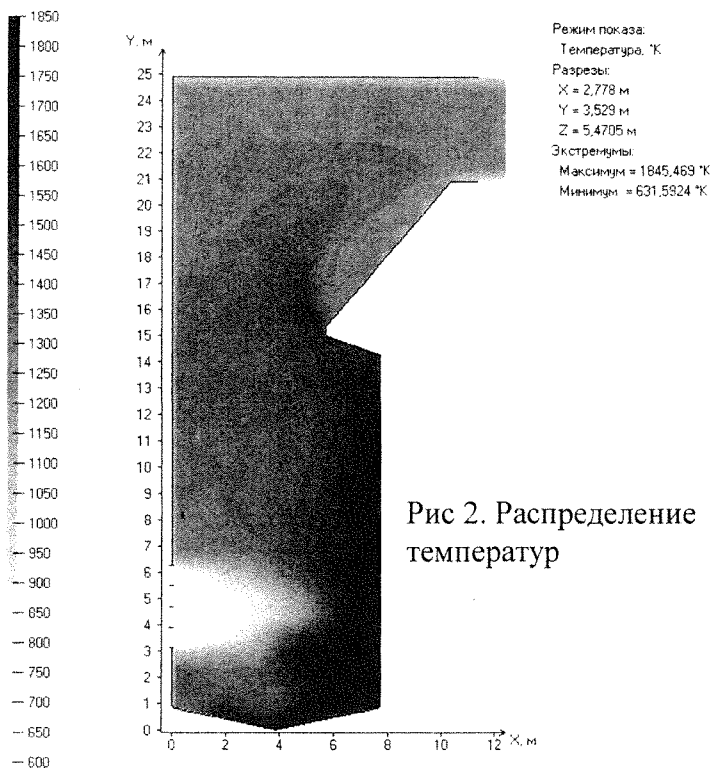


Рис 2. Распределение температур

### Результаты моделирования

Моделирование проводилось при численном анализе неизоотермической аэродинамики в топке котла БКЗ-220-100ЖЩ. В Томском политехническом университете для этого котла накоплены обширные данные, проведено моделирование на масштабной модели. Котел принадлежит к виду призматических топков. Его высота 24,9 метра, ширина 8,64 метра, глубина в районе горелок 7,74 метра. Горелки расположены в 4 ряда на высоте 3,139 метра от низа топки до нижней части горелок и имеют высоту 3,12 метра и ширину ~0,4 метра. Направление горелок составляет 15° к горизонту после реконструкции особенностей ввода топлива. По вертикали сопла горелок располагаются под следующими углами: -15°, -7°, 7° и 15°. Углы рассчитаны так, чтобы струи сходились к осевой линии топки на тыльной стороне.

Как видно из аэродинамики топки (Рис. 1), струи топливной смеси входят в топку и ударяются в противоположную стену, разделяясь на два потока. Первый поток уходит вниз и образует вихревое циркулирующее движение, поддерживающее входящий поток из горелок снизу. Затем его часть проходит между горелок и уходит вверх к выходу. Второй поток вдоль задней стенки сразу выходит вверх.

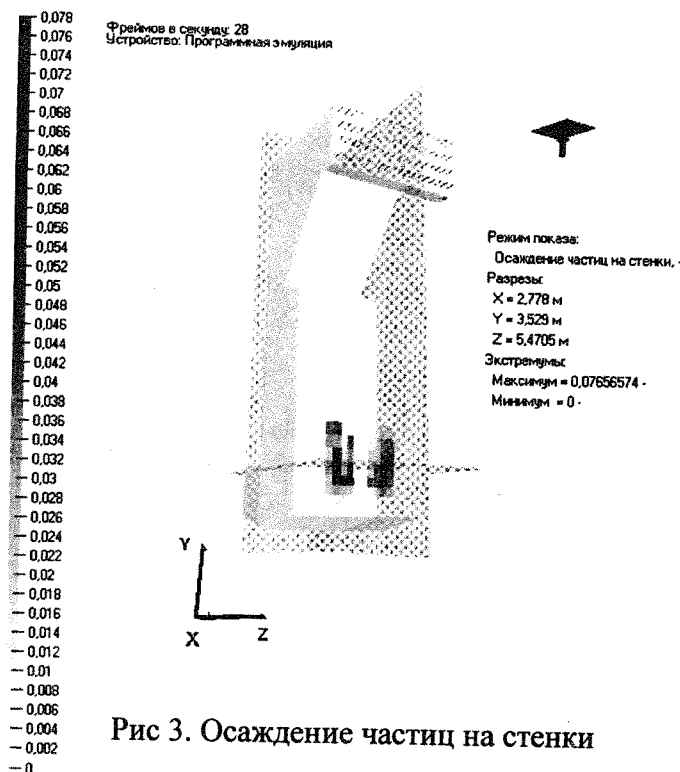


Рис 3. Осаждение частиц на стенке

На рисунке 2 показано температурное поле полидисперсного факела. Входящая струя не обладает высокой температурой, и горение развивается вдоль задних экранов и задней части пода и к выходу остывает. Осаждение частиц на экраны, как показывают данные математической модели (рис. 3), происходит в основном в месте удара горелочной струи о задний экран на уровне горелок, при этом коэффициент шлакоулавливания при заданной температуре плавления зольного остатка 1550K составил величину 40%. Данная температура соответствует приблизительно 10% - 20% жидкой фазы для Назаровского угля [7]. Это ниже, как предполагается, необходимого количества жидкой фазы в частице для прилипания ее к стенке. Понятно, что при большей заданной величины температуры плавления коэффициент шлакоулавливания упадет.

### Литература:

1. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. - Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1998.
2. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. - М.: Наука, 1994.
3. Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование/ А.А. Мостафа, Х.Ц. Монджиа, В.Г. Макдонелл, Г.С. Самуэльсен // Аэрокосмическая техника, 1990, №3.
4. Асланян Г.С., Майков И.А. Численное исследование влияние турбулентности на процессы горения // Теплофизика высоких температур, 1994, Т.32, №6.
5. Кроу, Шарма, Сток. Численное исследование газок капельных потоков с помощью модели «капля-внутренний источник» // Теоретические основы инженерных расчетов, 1977, Т. 99, №2.
6. Fischer K., Leithner R., Muller H. Three-dimensional model of the gas-solid flow in coal-dust fired furnace //Proceeding of the First Int. Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Rome. Italy, 1995, V.1.
7. Заворин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей (теплотехнический аспект). – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997.