

УДК 536.46:532.517.4

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ ДИФFUЗИОННО- КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ

Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Гаврилов А.А

*Институт теплофизики СО РАН Российская Федерация г. Новосибирск*

В работе дается описание математической модели для расчета факельного сжигания пылеугольного топлива. Авторами предложена модифицированная диффузионно-кинетическая модель горения частицы. Введение в модель ряда параметров, позволило более точно описывать процесс горения угольных частиц.

Основой для моделирования двухфазных потоков послужил пакет программ "σFlow", который включает: модель движения газа, модель турбулентности, модель теплопередачи излучением, модель газового горения. В качестве математической модели для описания течения принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Для описания турбулентного режима течения используется модифицированная k-ε модель Чена.

Для описания движения частиц применяется траекторная модель. Движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки, с учетом сил сопротивления и силы тяжести. Учет влияния турбулентности потока на движение частицы производится введением флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц. Скорость газа представляется в виде суммы осредненной составляющей скорости и случайной величины, которая в рамках локального изотропного приближения выбирается из нормального закона распределения с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением  $\sigma = (2k/3)^{0.5}$ . Поле турбулентности моделируется совокупностью вихрей различного размера, а разыгрываемая флуктуация скорости полагается неизменной внутри вихря в течение времени его жизни. Как только частица покидает вихрь или истекает время жизни вихря, генерируется новая флуктуация. Время жизни и размер вихря, с которыми связывается флуктуация, определяются локальными турбулентными характеристиками течения. Так как частица обладает инерцией и может выйти из вихря до его исчезновения, то время взаимодействия частицы с вихрем определяется из минимума времени жизни вихря и времени прохождения частицы через вихрь.

Процесс горения угольной частицы можно представить в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка.

Скорость испарения влаги из топлива рассчитывается на основе значений концентраций водяного пара на поверхности частицы и в объеме [1]

$$N_{H_2O} = k_c (C_{H_2O,S} - C_{H_2O,\infty}) \quad (1)$$

$N_i$  – молярный поток пара,  $k_c$  – коэффициент массопереноса,  $C_{H_2O,S}$  – концентрация пара на поверхности частицы,  $C_{H_2O,\infty}$  – концентрация пара в объеме;

Величина  $N_{H_2O}$  предполагается всегда положительной. Концентрация пара на поверхности выражается через парциальное давление на поверхности, которое равно давлению насыщения при температуре частицы.

$$C_{H_2O,S} = \frac{P_{sat}(T_q)}{RT_q} \quad (2)$$

Концентрация пара в объеме находится из решения уравнения переноса компоненты  $H_2O$ .

$$C_{i,\infty} = X_i \frac{P_{op}}{RT_\infty} \quad (3)$$

$X_i$  - локальная объемная мольная доля компонента  $H_2O$ ,  $p_{op}$  - рабочее давление,  $T_\infty$  - локальная температура в газе

Выход летучих рассматривается в рамках однокомпонентной схемы в кинетически-диффузионном приближении, где кинетика определяет реакционную способность, а диффузия – сопротивление частицы выходу летучих.

$$\frac{\partial V_g}{\partial \tau} = (V^T - V_g) \alpha_{g.l.} \quad (4)$$

$$\alpha_{g.l.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{л.диф.}} + \frac{1}{\alpha_{л.кин.}}} \quad (5)$$

$$\alpha_{л.диф.} = \frac{const}{\delta^2} \quad (6)$$

$$\alpha_{л.кин.} = K_{g.l.} e^{-E_{g.l.}/RT} \quad (7)$$

$V_g$  – количество вышедших летучих,  $V^T$  – количество летучих в исходной угольной частице,  $\alpha_{g.l.}$  - скорость выхода летучих;  $\alpha_{л.диф.}$  - скорость выхода в диффузионном режиме;  $\alpha_{л.кин.}$  - скорость выхода в кинетическом режиме;  $K_{g.l.}$  - предэкспоненциальный множитель;  $E_{g.l.}$  - энергия активации;

При горении коксового остатка используется кинетически - диффузионная модель. Введение в модель переходного критерия  $\eta$  [2] позволило достаточно хорошо описать горение угольной частицы в области перехода от кинетического к диффузионному режиму горения. При горении коксового остатка принималось, что изменяется диаметр, а плотность частицы остается постоянной. Изменение диаметра частицы за счет горения описывается уравнением

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{2}{\rho_K} * K_S^C \quad (8)$$

$$K_S^C = \beta C_{O_2} (273/T_g)^* \alpha_k \quad (9)$$

$$\alpha_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{k.кин}} + \frac{1}{\alpha_{k.диф}}} \quad \text{при } \alpha_{k.кин} < \eta\alpha_{k.диф} \quad (10)$$

$$\alpha_k = \alpha_{k.диф} \quad \text{при } \alpha_{k.кин} > \eta\alpha_{k.диф} \quad (11)$$

$$\alpha_{k.диф} = \frac{Nu_D D}{\delta} \quad (12)$$

$$Nu_D = 2 + 0.22 Pe^{0.66} \quad (13)$$

$$\alpha_{k.кин} = K_k e^{-E_k/RT} \quad (14)$$

$\rho_k$  - плотность коксового остатка (кг/м<sup>3</sup>);  $K_S^C$  - скорость горения углерода (кг/(м<sup>2</sup>\*с));  $Nu_D$  - диффузионное число Нуссельта;  $D$  - коэффициент диффузии в газе (м/с).  $\alpha_k$  - суммарный коэффициент скорости реагирования;  $\alpha_{k.кин}$  - коэффициент реакционного газообмена,  $\alpha_{k.диф}$  - коэффициент переноса, характеризующий скорость подвода кислорода к поверхности частицы.

Температура частицы определяется уравнением сохранения энергии

$$\frac{m_p C_p dT_p}{4\pi r_p^2 dt} = \varepsilon \sigma (T_{рад}^4 - T_p^4) + \alpha_{конв} (T - T_p) + \frac{QH}{4\pi r_p^2} \quad (15)$$

$C_p$  - теплоемкость материала частицы (Дж/(кг\*К));  $\varepsilon$  - степень черноты материала частицы;  $\sigma$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела (Вт/(м<sup>2</sup>\*К<sup>4</sup>));  $T_{рад}$  - температура излучающего объема (К);  $T_p$  - температура частицы (К);  $\alpha_{конв}$  - коэффициент конвективной теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>\*К));  $Q$  - удельный тепловой эффект реакции (Дж/кг),  $H$  - скорость реагирования.

В процессе сжигания пылевидных топлив, частицы угля, находящиеся во взвешенном состоянии, движутся вместе с газоздушным потоком. Следовательно, обтекание частицы потоком газа будет характеризоваться малыми значениями числа Re. Экспериментально полученные формулы для определения числа Nu в общем виде описываются зависимостью

$$Nu = 2 + a Re^m Pr^n$$

На основании теоретических и экспериментальных исследований для мелких, не газовыделяющих частиц получено, что при малых значениях числа Re критерий Нуссельта равен двум.

Если в процессе моделирования выхода летучих из частицы при расчете конвективного теплообмена использовать  $Nu=2$ , то расчетное время разогрева оказывается приблизительно в 2 раза меньше экспериментального. Этот результат можно рассматривать как свидетельство того, что при стадии выхода летучих из угольных частиц происходит торможения конвективного теплообмена.

Ослабление конвективного теплообмена, можно объяснить выходом паро- и газообразных веществ с поверхности угольных частиц при их разогреве. Данные процессы в модели можно учитывать ведением числа Нуссельта в зависимости от критерия Пекле внешнего омывания ( $Pe$ ) и критерия Пекле газовыделения ( $\bar{Pe}$ ) (Ю.М. Петин[3])

$$Nu = 2 + \frac{Pe}{2} - \frac{37}{960} Pe^2 - \frac{Pe\bar{Pe}}{4} - \frac{\bar{Pe}}{2} \quad (16)$$

При  $Pe=0$  имеется более точная зависимость

$$Nu = \frac{\bar{Pe}}{e^{\bar{Pe}/2} - 1} \quad (17)$$

При аппроксимации выражения кусочно-линейной функцией типа

$$Nu = 2 + \sum_{m=1}^{m'} a_m (\bar{Pe} - \bar{Pe}_m) \quad (18)$$

получим

$$Nu = 2 - 0.4\bar{Pe} + 0.267(\bar{Pe} - 2.5) + 0.113(\bar{Pe} - 10) \quad (19)$$

$$\bar{Pe} = \frac{w\delta}{a}, \quad (20)$$

$w$  - скорость выхода продуктов реакции и летучих

Полученные Л.Н. Хитриным результаты экспериментов показывают, что при горении углеродных частиц теплообмен с газовой средой протекает более интенсивно, чем это можно было ожидать, основываясь на опытах по массообмену. В связи с этим в математическую модель вводится коэффициент, учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен.

$$\alpha_{конв}^{гор} = \alpha_{конв} K_{гор} \quad (21)$$

где  $\alpha_{конв}^{гор}$  - эффективный коэффициент конвективного теплообмена между горящими угольными частицами и газом;  $\alpha_{конв}$  - коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности частицы при отсутствии горения.

Эксперименты проведенные В. И. Бабием, Ю.Ф. Куваевым [4] показали, что коэффициент  $K_{гор}$ , учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен между частицами угольной пыли и газовой средой, в определенном интервале, мало зависят от размеров частицы и концентрации кислорода в газовой среде и в интервале температур 1200-1600К коэффициент  $K_{гор}$  может быть записан в следующем виде:

$$K_{гор} = 145e^{-\frac{5000}{T}} \quad (22)$$

Уравнения сохранения для газовой фазы записываются в виде обобщенного закона сохранения [5]. Для получения конечно-разностный аналога обобщенного уравнения используется метод контрольного объема. Вычисление диффузионных потоков на гранях контрольного объема основано на центрально-разностной схеме,

имеющей второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема квадратичной интерполяции против потока (схема Леонарда или QUICK-схема), в значительной степени минимизирующая схемную вязкость. Связь поля скорости и давления организована с использованием SIMPLE-C процедура.

После получения поля течения газа выполняется расчет траекторий частиц. При необходимости проводится расчет параметров течения газа с учетом новых источников членов. Источниковые члены, учитывающие влияние дисперсной фазы на несущую, формируются с использованием Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL) метода [6].

Для верификации разработанной математической модели были проведены расчеты по выгоранию одиночной угольной частицы. Результаты сравнивались с экспериментальными данными В. И. Бабия, Ю.Ф. Куваева [4].

На рис.1 показана зависимость длительности горения мелких частиц антрацита от их размеров. Как можно видеть, использование выражения (10) для коэффициента скорости реагирования (кривая « $\alpha$ » на рис.1) приводит к существенной неточности расчета в области размеров частиц, 20 – 200 мкм. Введение переходного критерия  $\eta=1$  дает возможность удовлетворительно согласовать расчет с экспериментом.

На рис.2а показано изменение температуры частицы антрацита диаметром 545 мкм. в процессе выгорания. Видно, что использование в модели переменного числа Нуссельта на основе выражений (19, 22) позволило удовлетворительно согласовать расчет с опытом. На рис.2б показано изменение температуры частицы бурого Назаровского угля при ее выгорании в газовой среде с концентрацией кислорода 21% и температурой 1400 К. Резкий скачок температуры на экспериментальной кривой соответствует горению летучих в газовой среде. После выгорания летучих, пирометр показывал температуру коксового остатка.

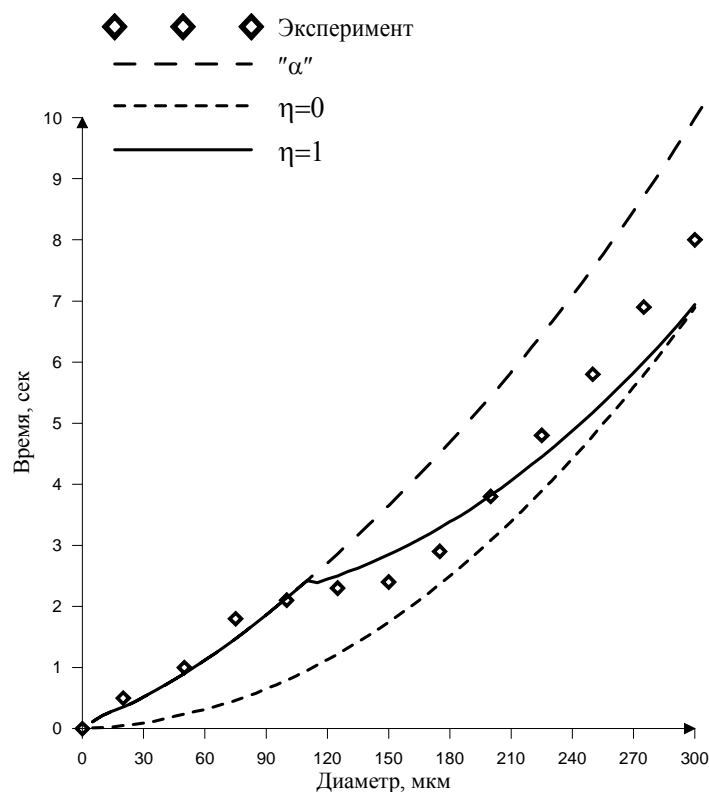


Рис.1 Зависимость длительности горения мелких частиц антрацита от их размеров ( $O_2=5\%$ ,  $T=1600$  К)

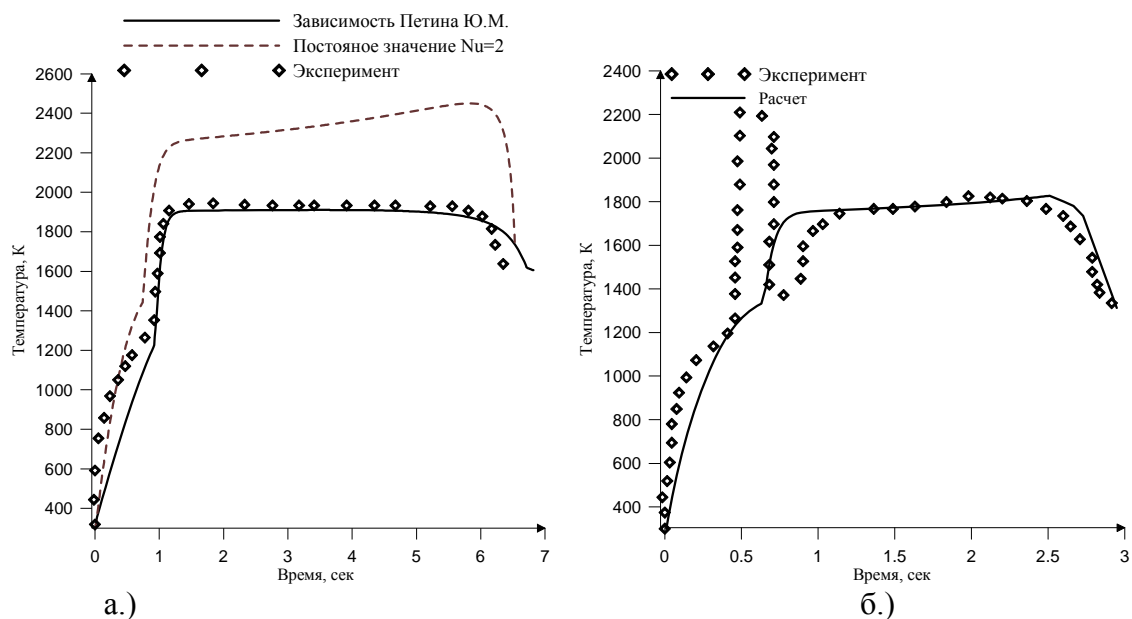


Рис.2 а.) Изменение температуры частицы антрацита в процессе ее выгорания диаметром 545 мкм при концентрации  $O_2=21\%$  и  $T=1600$  К. б.) Изменение температуры частицы назаровского угля по мере выгорания диаметром 500 мкм при концентрации  $O_2=21\%$  и  $T=1400$  К

Математическая модель горения мелкодисперсного твердого топлива была использована для расчета сжигания ирша-бородинского угля на огневом стенде СибВТИ [7]. Полученные результаты расчета сравнивались с имеющимися экспериментальными данными. Топочная камера огневого стенда имеет высоту 6 м. и внутренний диаметр 0.4 м., выложена из шамотного кирпича. Подача топлива осуществлялась через прямоточную горелку с первичным воздухом, окруженным вторичным воздухом. В эксперименте проводилось измерение температур и определение газового состава по длине камеры. Технический, элементный и гранулометрический состав угля приведен в таблице 1. Расход и температуры топлива и воздуха поступающие в камеру приведены в таблице 2.

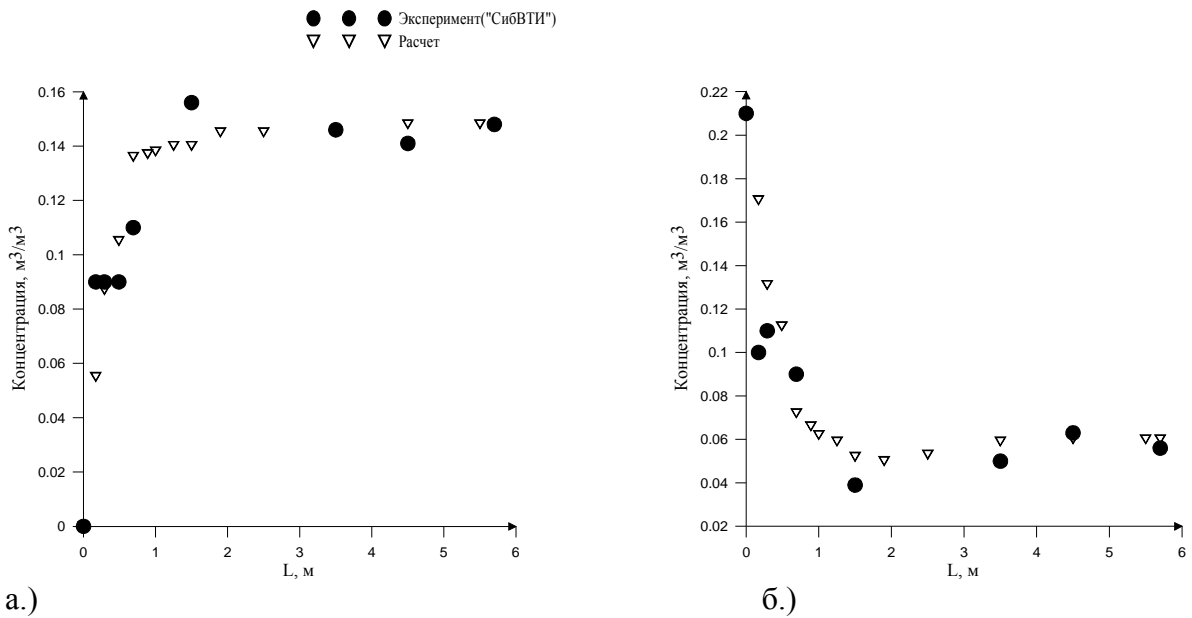
Таблица 1 Технический, элементный и гранулометрический состав угля

Технический и элементный состав, %						МДж/кг			Гранулометрический состав, %		
W <sub>r</sub>	Ad	Vdaf	Cdaf	Hdaf	Sd	Ndaf	Qdaf	Q <sub>r</sub>	R1000	R200	R90
16.8	11.2	47.0	72.2	4.4	0.26	1.1	28.1	19.6	0.0012	5.2	32.3

Таблица 2 Теплотехнические параметры

Расход топлива	60 кг/ч
Расход воздуха	465 м <sup>3</sup> /ч
Температура вторичного воздуха	205 °С
Температура первичного воздуха	125 °С
Коэффициент избытка воздуха	1.34

Изменение газового состава топочных газов по длине факела представлено на рис.3. Приведены концентрации кислорода O<sub>2</sub> (рис.3а) и диоксида углерода CO<sub>2</sub> (рис.3б) по высоте топочной камеры полученные опытным путем и вычисленные по приведенной выше модели.



а.) б.)  
 Рис.3 а.) Концентрация кислорода O<sub>2</sub> м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> по высоте топочной камеры б.) Концентрация диоксида углерода CO<sub>2</sub> м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> по высоте топочной камеры

Как по опытным данным, так и по результатам численного моделирования на расстоянии до 1.5 - 2 м от среза горелки происходит резкое снижение концентрации O<sub>2</sub> и увеличение концентрации. Далее значения концентраций стабилизируются на уровне 5÷6% для O<sub>2</sub> и 14-15% для CO<sub>2</sub>. В течение этого интервала заканчивается процесс выделения и выгорания летучих веществ.

На рис.4 представлено изменение температуры топочных газов.

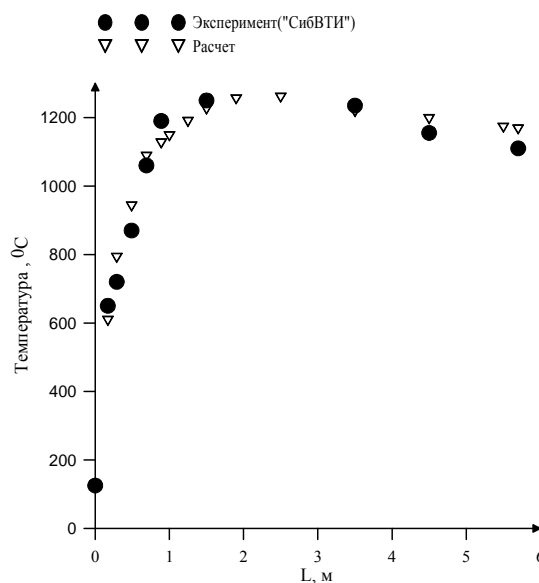


Рис.4 Температура (°C) по высоте топочной камеры

К моменту выгорания летучих веществ, температура факела достигала своего максимального значения  $T_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$  в опытных данных и  $T_{\max}=1255^{\circ}\text{C}$  в расчетах. Температура на выходе из топki при  $1110^{\circ}\text{C}$  по экспериментальным данным и  $1150^{\circ}\text{C}$  при численном моделировании.

Результаты моделирования и сравнения с экспериментальными данными позволяют сделать вывод, что представленная модель хорошо горение угольных частиц и может быть использована для расчета горелочно-топочных устройств и оптимизации процессов горения.

## **Литература**

- [1] Документация Fluent 6.0, 19.3. Heat and Mass. Fluent Inc. 2001
- [2] Разработка методов расчетной оптимизации процесса горения угольной пыли в топочных устройствах М.: ВТИ 1973
- [3] Горение твердого топлива. Материалы III Всесоюзной конференции. Новосибирск, «Наука», 1969. 362 с.
- [4] Бабий В.И. Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 209 с.
- [5] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [6] С.Т. Crowe, М.Р. Sharma, D.E. Stock, Trans. ASME, J. Fluid Eng. 99, 325(1977)
- [7] Разработка технических предложений по проектированию котла 500 т/ч с трехступенчатым сжиганием и системой сухой сероочистки активированной золой Красноярск.: СибВТИ 1996