

В.В. Васильев¹, А.А. Гаврилов², А.А. Дектерев², Е.С. Тэнфер³

ОАО «СибВТИ», Красноярск, Россия (1)

Институт Теплофизики СО РАН, красноярский филиал, Россия (2)

Красноярский государственный технический университет, Россия (3)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ КОТЛА 800 МВт

АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель процессов аэродинамики, теплообмена, горения пылеугольного топлива в топочной камере энергетического котла. Проведено исследование возможных вариантов реконструкции топочной камеры, направленных на снижение уровня шлакования топочных экранов и повышения тепловой эффективности топки. На основе результатов моделирования сделаны предложения по схеме реконструкции агрегата.

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации котла П-67 Березовской ГРЭС-1 было выявлено интенсивное локальное шлакование топочных экранов, снижающее эффективность его работы. Для исследования режимов работы котла и анализа вариантов его возможной реконструкции использовался пакет компьютерных программ «сFlow».

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве математической модели для описания течения в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. В рассматриваемой задаче течение газа считается установившимся, поэтому все уравнения записываются в стационарной постановке. Считается, что топочные газы состоят из N₂, O₂, CO₂, H₂O и комплекса летучих VOL. Модель включает следующие уравнения:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = S_{p,m} \quad (1)$$

где $S_{p,m}$ – скорость изменения массы газовой фазы за счет межфазного взаимодействия;

уравнения баланса количества движения:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\tau^m + \tau^r) + (\rho - \rho_w) \mathbf{g} \quad (2)$$

где τ^m – тензор вязких напряжений, а τ^r – тензор Рейнольдсовых напряжений;

уравнение переноса концентрации (массовой доли) i -го компонента:

$$\frac{\partial \rho f_i}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot f_i) = \nabla \left(\left(D_i + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \cdot \nabla f_i \right) + S_i + S_{p,i} \quad (3)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии, Sc – турбулентное число Шмидта, S_i – источниковый

член за счет реагирования, $S_{p,i}$ – источниковый член для i -го компонента за счет массообмена и реагирования газовой фазы с частицами угля;

уравнение переноса энергии

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot h) = \nabla \left(\left(\lambda + \frac{c_p \mu_i}{Pr_i} \right) \cdot \nabla T \right) + S_{ch} + S_R + S_{p,h} \quad (4)$$

S_{ch} , S_R , $S_{p,h}$ – источниковые члены в уравнениях соответственно за счет изменения тепла в процессе газозафазного реагирования, притока тепла за счет излучения и горения коксовых частиц, Pr_i – турбулентное число Прандтля.

Для описания турбулентных характеристик течения используется модифицированная высокорейнольдсовая k - ϵ модель турбулентности [1].

Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 аппроксимации метода сферических гармоник [2]. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов.

Расчет горения летучих компонент топлива основан на использовании глобальных необратимых реакцией между горючим и окислителем. Скорость горения определяется по модели "обрыва вихря" [3].

$$R_{vol} = -A \frac{\rho \epsilon}{k} \min \left(f_{vol}, \frac{f_{O_2}}{S_{O_2}} \right) \quad (5)$$

где A – эмпирическая константа; f_{vol} , f_{O_2} – концентрации летучих и окислителя; S_{O_2} – стехиометрический коэффициент в реакции горения.

Для описания процессов движения угольной пыли использовался метод Лагранжа. При моделировании движения частиц основными силами, воздействующими на частицу, являются сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического сопротивления) и сила тяжести. В процессе движения угольной частицы происходит ее прогрев, сопровождающийся выходом остаточной влаги и летучих, горение летучих и коксового остатка. Для моделирования процессов горения угольной пыли в настоящей работе была принята модель, основанная на обобщении экспериментальных данных [4].

Согласно этой модели сначала происходит про-

цесс прогрева частицы в течение времени τ_1 , на следующем этапе τ_2 выходят летучие, далее частичка кокса прогревается τ_3 и на четвертом этапе τ_4 происходит выгорание коксового остатка:

Зависимости τ_j времени j -го этапа (1-4) от параметров топочной среды для соответствующих углей приведены в [4]. Изменение массы угольной пыли на j -ом этапе определяется по следующему закону:

$$\frac{dm_j}{dt} = -\frac{m_{j0}}{\tau_j}, \quad (6)$$

здесь m_j , m_{j0} – текущая и начальная массы компонента угольной частицы, которая выделяется на j -м этапе.

Было принято допущение о тепловом равновесии между газом и частицами. Пренебрегалось влиянием частиц на турбулентные свойства газа. Влияние частиц на осредненное движение газа, изменение концентрации газовых компонент и энтальпию учитывалось на основе метода PSI-cell, предложенного Кроу [5]. В результате расчета процессов выхода влаги и летучих, горения кокса происходит формирование межфазных источников членов уравнений энтальпии $S_{p,h}$ и газовых компонент $S_{p,g}$.

Для описания шлакования использовалась модель, позволяющая качественно предсказать зоны осаждения частиц на поверхности топочной камеры. Использовалась эмпирическая модель, в соответствии с которой вероятность осаждения частицы на стенку считается постоянной величиной. Величина вероятности осаждения определялась путем обработки данных, полученных на экспериментальном стенде для используемого угля [6].

При моделировании образования NO_x учитывались три механизма: образование термических NO_x по модели Зельдовича [7]), образование быстрых NO_x по модели Фенимора [8] и образование топливных NO_x [9]. Вводятся дополнительные уравнения переноса для концентраций NO и HCN :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho f_{\text{NO}}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot f_{\text{NO}}) &= \nabla(D \cdot \nabla f_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}} \\ \frac{\partial \rho f_{\text{HCN}}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot f_{\text{HCN}}) &= \nabla(D \cdot \nabla f_{\text{HCN}}) + S_{\text{HCN}} \end{aligned} \quad (7)$$

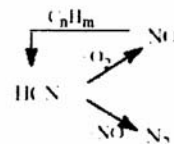
Источниковый член в уравнении переноса для концентрации компоненты NO за счет термического пути образования NO_x соответствует модели Зельдовича [7].

Быстрые NO_x образуются в присутствии углеводородных радикалов, которые преобладают в топливах с высоким значением молекулярного отношения водорода к углероду H:C . Механизм быстрого образования NO_x был предложен Фенимором [8]. Источниковый член в уравнении для NO вычисляется по формуле:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_{pr} [\text{O}_2]^a [\text{N}_2] [\text{VOL}] \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\text{где } k_{pr} = 1.2 \cdot 10^7 (RT/p)^{a+1} \quad E_a = 60 \text{ ккал/моль.}$$

Топливные NO_x – результат взаимодействия кислорода с азотом топлива. В процессе газификации угольного топлива и горения коксового остатка происходит превращение азотосодержащих соединений. Для расчета топливных NO_x реализована модифицированная модель de Soete [10], состоящая из трех глобальных реакций:



$$\begin{aligned} \frac{dx_{\text{HCN}}}{dt} &= -3.5 \cdot 10^{10} \exp(-3370/T) x_{\text{HCN}} x_{\text{O}_2}^a \\ \frac{dx_{\text{HCN}}}{dt} &= -3 \cdot 10^{12} \exp(-30200/T) x_{\text{HCN}} x_{\text{NO}} \\ \frac{dx_{\text{NO}}}{dt} &= -2.7 \cdot 10^6 \exp(-9466/T) x_{\text{NO}} x_{\text{C}_n\text{H}_m} \end{aligned} \quad (9)$$

Для численной реализации перечисленных процессов используется метод контрольного объема на структурированных криволинейных неортогональных сетках с блочной техникой. Для несжимаемых течений связь полей скорости и давления осуществляется применением SIMPLE-C процедуры. Аппроксимация конвективных потоков строится с использованием схем высокого порядка точности. Решение систем линейных алгебраических уравнений достигается эффективными процедурами, основанными на вариационных модификациях метода неполной факторизации Булеева.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные для моделирования представлены в Таб. 1-3.

Таблица 1. Входные параметры.

расход топлива, кг/с	125,8
α (избыток воздуха)	1,2
температура смеси газов на входе в горелки, °C	286
низшая теплота сгорания, МДж/кг	28,26
выход летучих на горючую массу, %	48,02

Таблица 2. Распределение частиц угля по фракциям

мкм	50	100	200	500	1000
доля	0,26	0,47	0,22	0,04	0,01

Таблица 3. Состав угля (уголь Березовского разреза КАТЭК)

C	H	N	O	S	зольность	влажность
45.05	3.08	0.43	12.4	0.34	4,09	34,6

Выполнены расчеты существующей топочной камеры котла П-67 и проведено сравнение с данными натурных измерений.

Таблица 4.

	эксперимент	модель
температура на выходе из топки °С	1120	1105
расход золы в холодную воронку, кг/час	639	637
выбросы NO _x , мг/м ³	450	484

На Рис. 3,4 приведены расчетные результаты по аэродинамике и теплообмену в топке. Результаты моделирования показали, что области интенсивного шлакования вблизи четных блоков горелок обусловлены аэродинамической структурой потока в топке (Рис. 3в). В области между ярусами горелок происходит формирование угловых вихрей с прямым набрасыванием потока на стены вблизи четных блоков горелок, что отчетливо видно и по характеру температурного поля (Рис. 4в) и по интенсивности роста отложений (Рис. 6а).

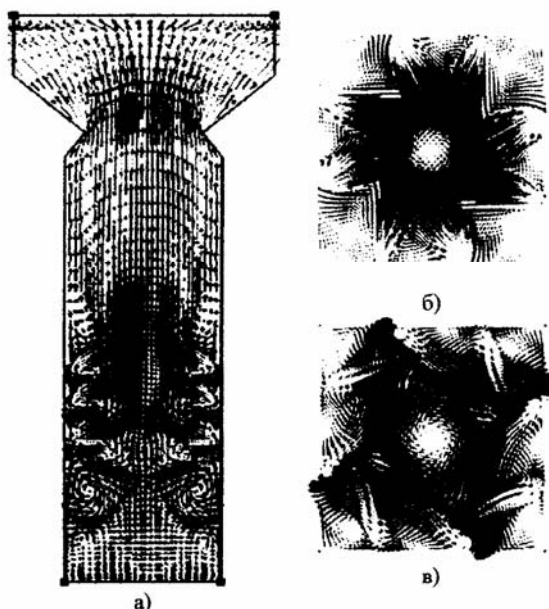


Рис. 3. Течение в существующей топке: а) вертикальное сечение по центру; б) горизонтальное сечение по второму ярусу горелок; в) горизонтальное сечение между вторым и третьим ярусами горелок.

После адаптации краевых условий был проведен вариантный счет по предлагаемым режимам реконструкции топочной камеры.

Были исследованы следующие в варианты возможной реконструкции топки:

1. организация нижнего дутья;
2. концентрическое сжигание (третичное дутье в плоскости горелок, 32 сопла);
3. сочетание нижнего дутья и концентрического сжигания (8 сопл у двух верхних ярусов нечетных блоков горелок);
4. организация яруса воздушных сопел выше зоны активного горения;
5. сочетание сопел в верхних ярусах горелок (кон-

центрическое сжигание) и вертикальной ступени сопел;

б. организация двух ярусов воздушных сопел выше зоны активного горения.

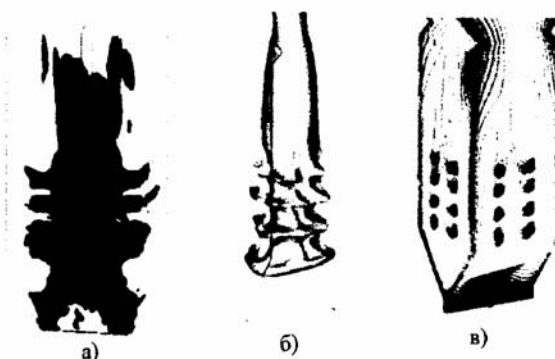


Рис. 4. Характеристики теплообмена и распределения угольных частиц в существующей топочной камере: а) поле концентрации угольной пыли; б) температура газов в объеме $\geq 1200^{\circ}\text{C}$; в) поле температур в пристеночной области.

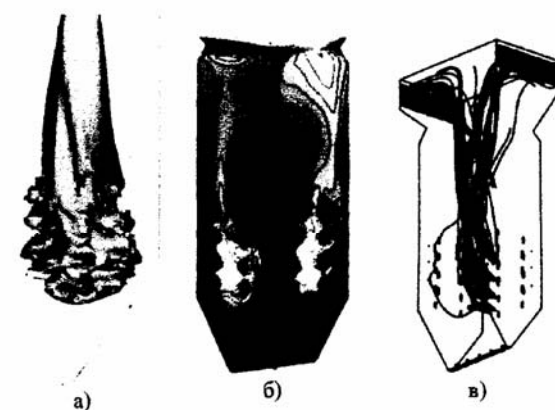


Рис. 5. Характеристики теплообмена и распределения угольных частиц в топочной камере с концентрическим сжиганием и нижним дутьем: а) температуры газов в объеме; б) поле температур в пристенной области; в) траектории частиц 100мкм.

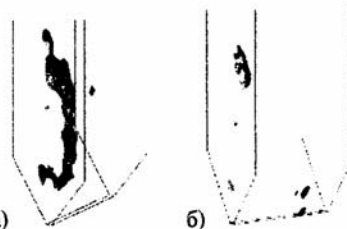


Рис. 6. Зоны максимальной сепарации частиц 100 мкм: а) существующий вариант; б) вариант с концентрическим сжиганием и нижним дутьем.

Выполнен сравнительный анализ фактического состояния топки и вариантов возможной реконструкции по таким критериям, как наброс факела на экраны, аэродинамическая стабильность факела, выгорание топлива, максимальные объемные и пристенные температуры газов, траектории движения частиц, температура газов на выходе из топки,

неравномерность температурного поля на выходе из топki.

Любой из рассмотренных вариантов реконструкции дает снижение температур газов в пристенной области зоны активного горения и в холодной воронке. Соответственно уменьшается темп шлакования. Максимальный эффект относительно существующего варианта достигается при сочетании нижнего дутья и концентрического сжигания. Расчетные поле температуры и траектории угольных частиц для этого варианта приведены на рис. 5. Для сравнения на рис. 6 показаны зоны максимальной сепарации частиц диаметром 100 мкм для базового и выбранного оптимального варианта.

Сравнение рассчитанных вариантов по средней температуре на выходе из топki показало снижение температуры при сочетании концентрического сжигания и нижнего дутья по сравнению с существующим вариантом (рис. 7), при этом уровень выбросов NO_x на выходе из топki не превышали нормативные требования (рис. 8).

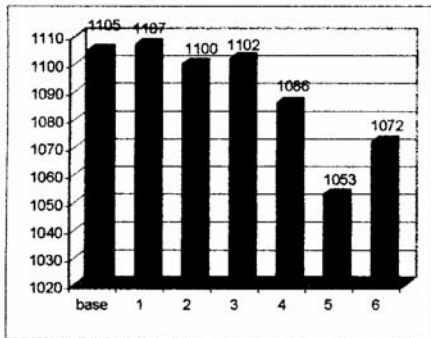


Рис. 7. Сравнение средних температур газов на выходе из топki, °С. Цифрами обозначены номера вариантов.

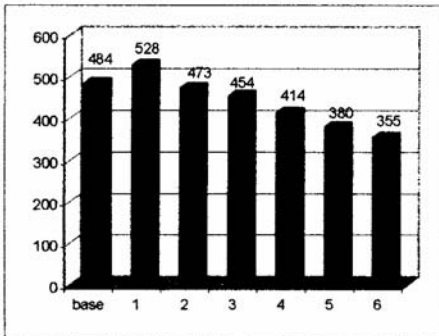


Рис. 8. Уровень выбросов NO_x , mg/nm^3 .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе методов вычислительной гидродинамики разработана модель процессов аэродинамики, теплообмена и горения пылеугольного топлива в топочной камере котла П-67.

Выполнен сравнительный анализ фактического состояния и вариантов возможной реконструкции топki. В результате проведенных исследований предложен вариант реконструкции топочной камеры обеспечивающий снижение интенсивности шлакования при уровне выбросов NO_x не превышающих нормативные требования.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

ρ - плотность, kg/m^3

ε - диссипация турбулентной энергии, m^2/s^3

μ_t - турбулентная вязкость, Па·с

g - гравитационная сила на единицу массы, m/s^2

v - вектор скорости, м/с

p - давление, Па

c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К)

T - температура, К

h - удельная энтальпия, Дж/кг

k - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, m^2/s^2

f_m - массовая концентрация, кг/кг

$[m]$ - объемная концентрация, моль/ m^3

x_m - молярная концентрация, моль/моль

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen, Y.S., and Kim, S.W.**, (1987), "Computation of turbulent flows using an extended k- ε turbulence closure model", NASA CR-179204.
2. **R. Siegel and J. R. Howell**, (1992), "Thermal Radiation Heat Transfer". Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.
3. **Magnussen, B.F., and Hjertager, B.W.**, (1981), "On the structure of turbulence and a generalised eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow", 19th AIAA Aerospace Meeting, St. Louis, USA.
4. **Бабий В.И., Куваев Ю.Ф.** Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986.-208 с.
5. **Crow, C.T., Sharma, M.P and Stock, D.E.**, (1977), "The Particle Source In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows", J. Fluids Engg., Trans. of the ASME, Vol. 99, pp. 325-332.
6. **Алехнович А.Н.**, Вероятностная модель формирования шлаковых отложений. Электрические станции. 1995, №2, с. 16.
7. **Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.** Окисление азота при горении. -М.: Изд-во АН СССР, 1947. -317 с.
8. **Fenimore C.P.**, (1979), "Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases", 17th Symp. (Int'l.) Comb., The Combustion Institute, Pittsburgh, P.661.
9. **G. G. De Soete**, (1975), "Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen", In 15th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 1093. The Combustion Institute.
10. **H. C. Magel, U. Greul, U. Schnell, H. Spliethoff, K.R.G. Hein**, (1996), "NO_x- reduction with staged combustion - comparison of experimental and modeling results", In Proc. Joint Meeting of the Portuguese, British, Spanish and Swedish Section of the Combustion Institute, Madeira.