XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. II: С. 98-103, 2003. © Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2003.

УДК 504.06:621.181.622.612

Тринченко А.А. (асп. каф. РиПГС), Шестаков С.М., д.т.н., проф.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВИХРЕВЫХ ТОПОК ЗА СЧЕТ РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА НА КОКСОВЫХ ЧАСТИЦАХ

В настоящее время для выработки электроэнергии и тепла твердое топливо, в основном, сжигается в пылеугольных котлах, имеющих ряд недостатков, для снижения влияния которых можно использовать низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания твердого топлива, разработанный и исследованный под руководством д.т.н., профессора В.В.Померанцева. При НТВ-сжигании в нижней вихревой зоне (НВЗ) топки циркулирует значительное количество реагирующих коксовых частиц, на поверхности которых возможно протекание реакции разложения оксидов азота:

$$(NO_x + C \rightarrow N_2 + CO_2), \tag{1}$$

что дополнительно снижает эмиссию NO_x . Однако, до настоящего времени, этот процесс был не достаточно изучен, ввиду чего возникла необходимость проведения дополнительных исследований.

Сложность процесса горения полифракционного топлива в HTB-топке (особенно горения дробленого топлива), и невозможность описать его единой системой дифференциальных уравнений, приводит к необходимости разделения процесса на отдельные блоки: сложной аэродинамики HTB-топки, стадийности процесса горения частиц топлива полифракционного состава, их разрушения под воздействием высоких температур и ударных напряжений, генерации и разложения NO_x на коксовых частицах в процессе многократной циркуляции.

Блок 1. Расчет аэродинамики НТВ-топки. НТВ-топка разбивалась на ряд характерных зон [1], каждая из которых описывалась своими закономерностями движения аэродинамических потоков. При разработке принималась плоская картина течения, что допустимо, т.к. нижнее дутье расположено по всей ширине топочной камеры, а горелки (например по технологии ЛПИ-ИТЭЦ-10) занимают более 85 % фронта котла.

Блок 2. Расчет траекторий движения частиц. Движение реагирующей частицы описывалось уравнением Мещерского:

$$m\frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{k} \vec{P}_i + (\vec{W}_p - \vec{V})\frac{dm}{d\tau},$$
 (2)

при этом частицы топлива неправильной формы заменены на шаровые, эквивалентные по объему.

Расчеты траекторий движения частиц в поле скоростей, полученном в блоке 1, проводились путем численного решения уравнения (2), учитывающего влияние двух основных сил: силы аэродинамического сопротивления и силы тяжести, записанного в проекции на оси декартовой системы координат:

$$m\frac{dv_{x}}{d\tau} = \frac{cf\rho_{z}}{2}(w_{x} - v_{x})\sqrt{(w_{x} - v_{x})^{2} + (w_{y} - v_{y})^{2}}$$

$$m\frac{dv_{y}}{d\tau} = \frac{cf\rho_{z}}{2}(w_{y} - v_{y})\sqrt{(w_{x} - v_{x})^{2} + (w_{y} - v_{y})^{2}} - mg$$
(3)

где: при Re ≤ 1 c(Re) = 24/Re; при Re $> 1 - 24/Re + 4/\sqrt[3]{Re}$; при Re> 100 - 0.48.

Блок 3. Разрушение топливных частиц. Разрушение частиц (на 2 или 4 равных по массе осколка) при ударе об ограждающие топку поверхности нагрева, рассчитывалось по экспериментальной зависимости (с учетом термических напряжений и критической скорости).

Блок 4. Обработка рассевочной кривой. Расход натурального твердого топлива

полифракционного состава пересчитывался на эквивалентный расход шаровых частиц. Распреде ление частиц по фракциям описывалось формулой Розина-Раммлера-Беннета.

Размер самой крупной частицы определялся соотношением:

$$\delta_{01} = (6,9/b)^{1/n}. (4)$$

Рассевочная кривая разбивалась на N=10 фракций, каждая из которых характеризуется своим средним диаметром: $\overline{\delta}_i = (\delta_i + \delta_{i+1})/2$.

Частота подачи частиц i-ой фракции в топку (шт/с) определяется по зависимости:

$$n_i = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{B}{\rho_{\tau} \cdot \overline{\delta}_i^3} \cdot \frac{R_i - R_{i+1}}{100}.$$
 (5)

Блок 5. Расчет поля температур. Распределение температур в HTB-топке определялось зональным тепловым расчетом путем численного решения системы балансовых уравнений, записанных для каждой из восьми зон (две по глубине и четыре по высоте топки):

$$T_{i}^{"} = \frac{(T_{ac}cB_{p}M_{T} + T_{ac}cB_{p}M_{ac} + T_{i}cB_{p}M_{T} + T_{TB}c_{B}B_{p}M_{TB} + T_{XB}c_{B}B_{p}M_{XB}}{cB_{p}(M_{T} + M_{ac} + M_{T} + M_{TB} + M_{XB})} - \frac{\sigma_{0}a\overline{T}_{i}^{4} \cdot \sum_{i} F_{i}\psi_{ij} - \beta_{i}B_{p}Q_{i}^{T}}{cB_{p}(M_{T} + M_{ac} + M_{T} + M_{TB} + M_{XB})}, K,$$

$$(6)$$

где: a — степень черноты зоны; $\Sigma F_{\mathrm{i}} \cdot \psi_{\mathrm{ij}}$ — сумма произведений поверхностей, ограничивающих зону, на коэффициенты тепловой эффективности ψ_{i} , M^2 ; M, T — соответственно массовые доли и температуры топочной среды, проходящей через каждую зону (M_{r} (T_{r}) — топочных газов из предстоящей по ходу газов зоны, M_{ac} (T_{ac}), M_{rB} (T_{rB}), M_{xB} (T_{xB}) — первичного, горячего и холодного воздуха; M_{T} — топлива, кг/кг); они оценивались по результатам расчетов блока 1. Величина первого приближения степени выгорания в зоне (β_{i}) задавалась на основании экспериментальных данных.

Коэффициенты переизлучения для плоскостей, разделяющих зоны, пересчитывались по средним температурам в зонах:

$$\psi_{ij}=1-(\overline{T}_i/\overline{T}_j)^4. \tag{7}$$

Тестирование результатов проведено по опытным значениям $T_{\rm T}^{''}$ и локальным T, полученным при комплексных исследованиях котлов ПК-24 и БКЗ-420-9. Оно показало высокую сходимость результатов для различных углей с разницей, не превышающей 2 %.

Блок 6. Расчет горения с учетом генерации и разложения NO_x . Модель горения частицы учитывает прогрев, сушку, выход летучих и горение коксового остатка. Время прогрева частиц до момента воспламенения летучих определялось с использованием эмпирических зависимостей: для мелких ($\delta \le 10^{-3}$ м) — Бабия В.И., для крупных ($\delta \ge 10^{-3}$ м) — Любова В.К. и Шестакова С.М.

Динамика выхода летучих описывалась выражением:

$$\frac{dV}{d\tau} = \sum_{i=1}^{n} C_{0i} \cdot k_{i} , \qquad (8)$$

где C_{0i} и k_i — соответственно доля определенной группы реакций и константа скорости, 1/c, (считаем, что она подчиняется зависимости Аррениуса); для расчета оказалось возможным применить двухкомпонентную схему.

Для оценки времени выхода и горения летучих использовались эмпирические выражения: для мелких частиц (δ ≤ 10^{-3} м) — Бабия В.И., для крупных (δ ≥ 10^{-3} м) — Любова В.К. и Шестакова С.М. Уменьшение плотности частиц в процессе сушки и выхода летучих веществ происходит до величины плотности сухого кокса топлива. Расчет горения коксовых частиц в НТВ-топке проводился по методике, разработанной в [2, 3].

Блок 7. Расчет генерации и разложения NO. Количество "топливных" оксидов азота ($T_{\rm max}$ <1800 K), образующихся на стадии выхода летучих из топлива, находилось по схеме, предполагающей разложение азотсодержащих веществ топлива до активного атомарного азота, частично рекомбинирующего в молекулярный азот (1. N+N=N₂) и частично окисляющегося до NO (2. mN+O₂=mNO):

$$\begin{cases}
\frac{dN_{2i}}{d\tau_{i}} = k_{01}e^{-E_{1}/RT_{i}} \frac{1}{T_{i}} [N_{i}]^{2} \\
\frac{dNO_{x_{i}}}{d\tau_{i}} = k_{02}e^{-E_{2}/RT_{i}} \frac{1}{T_{i}} [O_{2}]_{i}^{v} [N]_{i}
\end{cases}$$
(9)

где $E_1 = 4,2$ МДж/моль, $E_2 = 31,2$ МДж/моль — энергии активации соответствующих реакций; v = 1,8 — порядок реакции по кислороду (по экспериментальным данным Бабия В.И.).

Расчет показал, что образование "воздушных" оксидов азота при НТВ-сжигании не превышает 3...4 % от генерации "топливных", что дало возможность исключить их из рассмотрения. Распределение концентрации NO по сечению топки (без учета разложения) определялось путем численного решения (схема "против потока") дифференциального уравнения массообмена:

$$\frac{dm_i}{d\tau} = D\nabla^2 m_i \,, \tag{10}$$

при наличии источникового члена для каждой зоны, на которые разбивалась топочная камера $(3280 \text{ зон } 0.25 \times 0.25 \text{ м}).$

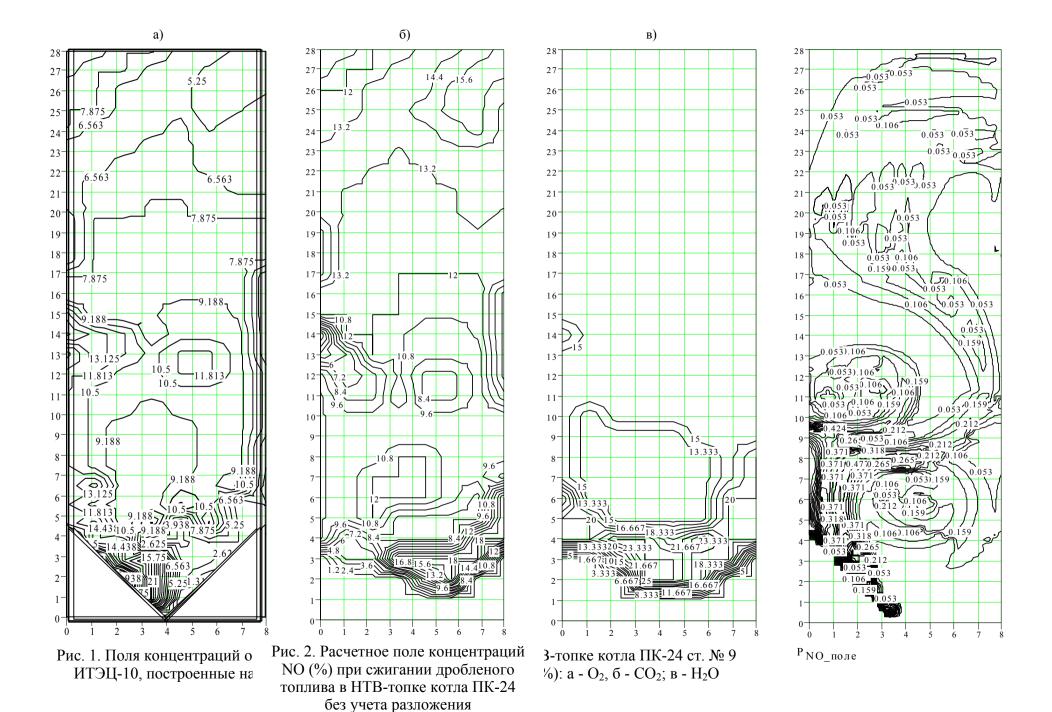
Блок 8. Геометрия топочной камеры. Задавалась координатами точек, по которым прямыми линиями строился замкнутый контур, ограничивающий топку.

Парциальные давления основных реагирующих компонентов (O₂, CO₂, H₂O) при расчете горения коксовой частицы, определялись из полей концентраций, построенных на основании обработки экспериментальных данных (рис. 1 а, 1 б, 1 в), полученных в комплексных испытаниях котлов ПК-24 ст.№ 9 ИТЭЦ-10 и БКЗ-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ. Поле концентрации NO (рис. 2) построено по результатам расчета. Расчет процесса горения проводился с определением количества разложившихся NO: по зонам, на 1 кг исходного топлива и на отдельно взятой частице каждой фракции с определением нового поля концентраций оксидов азота (с учетом разложения).

По разработанной методике составлен алгоритм и программа расчета. Так как программа имеет блочное построение, то это дает возможность проведения расчетов и анализа отдельных составляющих процесса горения в HTB-топке и в различных энергетических установках путем отключения отдельных блоков или подключения новых. Например, анализ сепарационных возможностей HTB-топки, исследование процесса термопневморазрушения частиц топлива, расчет $\Pi\Pi\Phi$, расчет реактора разложения NO_x в схеме ЭЧКУ и др.).

Тестирование отдельных блоков программы проводилось с использованием опытных данных различных авторов: Шестакова С.М., Парамонова А.П., Бабия В.И., Буланова Д.В., Котлера В.Р., Головиной Е.С. и др. Оно показало удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

По разработанной методике проведены расчетные исследования процесса горения твердых топлив (азейский, ирша-бородинский, березовский, черемховский, нерюнгринский, кузнецкий угли) с учетом разложения оксидов азота на коксовых частицах углей, сжигавшихся в топках котлов ПК-24 ст. №9 ИТЭЦ-10 и БК3-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ. Исходными данными для расчета являлись: состав топлива на рабочую массу, геометрия топочной камеры, расходы и скорости ввода горелочного воздуха ($W_{\text{гор}}$ =10...20 м/с) и нижнего дутья ($W_{\text{н.д.}}$ =50...100 м/с), поля концентраций основных газовых компонентов (O_2 , O_2 , O_3 , O_4



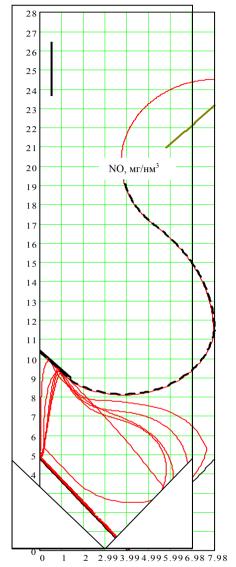


Рис. 3. Расчетные траектории движения горящих частиц в НТВ-топке котла ПК-24 ("настильный" режим): $--- \delta = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м;} --- \delta = 0,016 \text{ м}$

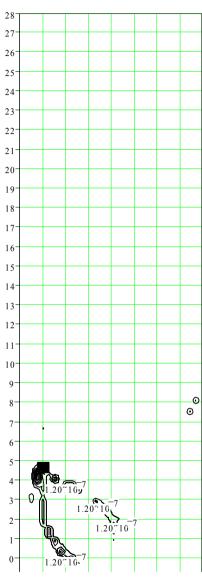
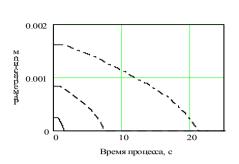


Рис. 4. Усредненное поле разложения оксидов азота (кг в элементарной ячейке $0.25 \times 0.25 \times 0.25 \text{ м}$) в HTB-топке котла ПК-24



a)

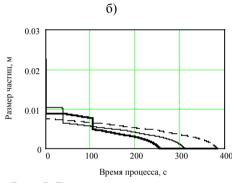


Рис. 5. Время выгорания частиц различных фракций азейского угля: $a - \text{мелких} (\delta < 2 \cdot 10^{-3});$ $6 - \text{крупных} (\delta > 8 \cdot 10^{-3})$

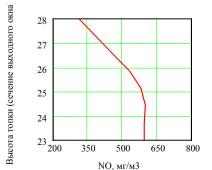
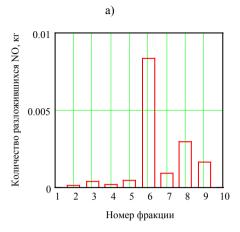


Рис. 6. Расчетный профиль концентраций NO (мг/нм 3) в сечении выходного окна топки котла ПК-24



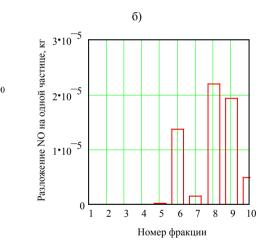


Рис. 7. Результаты расчета разложения NO на фракциях частиц 1 кг исходного топлива:

а – на всех частицах фракции;б – на одиночной частице фракции

Анализ траекторий движения частиц показал (рис. 3), что крупные частицы (δ >600·10⁻⁶ м) накапливаются на фронтовом скате HB3, образуя зону повышенных пристенных концентраций топливных и коксовых частиц. Горение этих частиц происходит до момента, когда под воздействием струи НД они могут быть вынесены в ПЧФ. В этой же зоне происходит основная эмиссия NO – область с максимальными концентрациями NO, к ней можно отнести так же вертикальный участок под горелками.

Наибольшее количество NO разлагается на фронтовом скате HB3 (рис. 4), т.к. в этой области — наибольшие концентрации оксидов азота, а крупные частицы топлива пребывают наибольший отрезок времени всего процесса горения (рис. 3, 5). По расчетным результатам построен профиль концентраций NO в сечении выходного окна, (рис. 6), которые удовлетворительно согласуются с опытными данными по концентрациям NO в уходящих газах. Расчеты показывают, что для корректного определения концентрации NO на выходе из топки, необходимо иметь несколько контрольных точек замеров для последующего усреднения (по расходу) экспериментальных результатов.

За счет разложения оксидов азота на коксовых частицах при расчете процесса горения азейского бурого угля, получено: снижение (на 28 %) концентрации NO в дымовых газах (NO" $_{\rm T}$ = 500 мг/нм 3); время горения — 383 с; q_4 =1,4 %. Это удовлетворительно согласуется с опытными данными С.М.Шестакова и А.П.Парамонова.

Несмотря на большую поверхность реагирования мелких частиц ($\delta_1 = 250 \cdot 10^{-6}$ м), доля разложившихся NO на мелких частицах (в ПЧФ) значительно меньше количества оксидов азота, разлагающихся в HB3 HTB-топки на крупных фракциях (рис. 7 а). Это объясняется малым временем горения мелких частиц топлива ($\sim 1,5...2$ секунды) (рис. 5) и несколько меньшими концентрациями NO в ПЧФ.

Анализ разложения NO на одиночной частице каждой фракции показал (рис. 7 б), что максимум достигается на частице размером $\delta_8 = 12 \cdot 10^{-3}$ м, (с учетом разрушения). Небольшая доля суммарного количества разложившихся NO на всех частицах 8-ой фракции (по сравнению с частицами 6-ой фракции) объясняется относительно малым количеством таких частиц в исходном топливе. Следовательно, для интенсификации процесса разложения NO в HTB-топке необходимо увеличивать долю крупных частиц с одновременным уменьшением количества мелких частиц в сжигаемом топливе. Малое количество NO, разложившихся на частицах 7-ой фракции ($\delta_7 = 1,62 \cdot 10^{-3}$ м) является следствием их разрушения и уменьшения размера, что перевело их в разряд фракций более мелких размеров, так же, как и частицу 10-й фракции ($\delta_{10} = 0,022$ м), которая разрушалась в процессе горения 2 раза (рис. 5).

На частицах $\delta = 0.835 \cdot 10^{-3} \dots 4.075 \cdot 10^{-3}$ м также происходит заметное разложение оксидов азота, однако, количество разложившихся NO значительно ниже, чем на крупных частицах. Это объясняется малым временем их пребывания в зоне максимальных концентраций NO и меньшим временем горения по сравнению с крупными частицами), но в тоже время больше, чем на мелких. Следовательно, увеличению разложения NO способствует пребывание частиц любых размеров в HB3 (на фронтовом скате топочной воронки) HTB-топки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Тринченко А.А. Приближенный расчет аэродинамической картины течения потоков в HTB-топке // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. III.: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 62-65.
- 2. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Разложение оксидов азота на углеродном материале // XXVII Неделя науки СПбГТУ. Ч.І: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 76-77.
- 3. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Методика расчета разложения оксидов азота на углеродном материале при низкотемпературном вихревом сжигании твердых топлив // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч.І: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. С. 143-145.