

УДК 662.613.5:621.181.7

А.А. Тринченко, асп. каф. РиПГС

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РАЗЛОЖЕНИЯ NO_x НА КОКСОВЫХ ЧАСТИЦАХ ПРИ ТРЕХСТУПЕНЧАТОМ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА

Сжигание органического топлива (газа, мазута и угля) в котлах для производства тепловой и электрической энергии сопровождается образованием и выбросом в атмосферу загрязняющих веществ. Одним из наиболее токсичных компонентов дымовых газов, наряду с оксидами серы (SO_x) и бенз(а)пиреном ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$), являются оксиды азота (NO_x). Замена угля природным газом, безусловно снижает вредное влияние производства энергии на атмосферу и человека. Однако в общих запасах ископаемого, не возобновляемого топлива газ составляет весьма небольшую часть - менее 2 %. Следовательно, снижение вредного экологического воздействия производства энергии на окружающую среду за счет замены твердого минерального топлива газообразным нельзя считать перспективным. Ограниченность запасов жидкого и газообразного топлива (а так же высокие темпы роста стоимости этих топлив в России), предопределяет долговременную перспективу использования относительно дешевого твердого топлива, которого, по различным оценкам, должно хватить на 200...500 лет.

В настоящее время твердое топливо, в основном, сжигается в виде пыли в топках пылеугольных котлов, что сопровождается выбросами как термических NO_x вследствие высокой температуры факела, так и топливных NO_x , генерируемых из азота топлива [1]. Несмотря на определенные успехи, проблема подавления оксидов азота на пылеугольных котлах остается весьма актуальной. В последнее время большое распространение получило ступенчатое сжигание топлива как метод снижения NO_x . Сущность метода заключается в ступенчатой (по ярусам горелок) подачи топлива и воздуха в топку [2]. На рис. 1 показана схема трехступенчатого сжигания. В первой нижней зоне топки (зона I) сжигается основная масса топлива (~90 %) при избытке воздуха $\alpha_1 \approx 1$, благодаря чему в нижнем ярусе топливо сгорает при недостатке окислителя, что способствует снижению генерации топливной составляющей NO_x . На выходе из зоны активного горения организуется зона II, в которую подается вторичное топливо (~10 %) с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в этой зоне составлял $\alpha_{II} \approx 0,9 \dots 0,95$. В результате этого в зоне II образуется восстановительная газовая среда с продуктами химического и механического недожога топлива. В восстановительной среде происходит разложение оксидов азота, выходящих из зоны I, на углеводе кокса вторичного топлива, с образованием молекулярного азота по реакции:



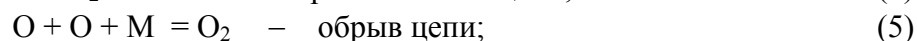
В зону III подается третичный воздух для дожигания продуктов химического и механического недожога топлива в верхней части топки. Ступенчатая подача топлива позволяет дополнительно несколько снизить максимальные температуры в топке, что так же снижает генерацию термических оксидов азота.

Целью настоящей работы являлась разработка методики расчета разложения оксидов азота на коксовых частицах при организации трехступенчатого сжигания пыли твердого топлива. Методика основана на диффузионно-кинетической теории горения [2]. При этом константа скорости реакции (1) может быть представлена в виде зависимости Аррениуса:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E/(RT)),$$

где $k_0 = 1,18 \cdot 10^4$, $E = 145$ кДж/моль приняты по [3].

Образование термических NO_x описывается зависимостью, предложенной Зельдовичем Я.Б., Садовниковым П.Я., Франк-Каменецким Д.А., где цепная схема окисления молекулярного азота определяется следующими реакциями:



где M - любая молекула, атом или радикал, участвующие в столкновении, но не претерпевшие химических изменений.

Скорость суммарной реакции генерации оксидов азота: $\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{NO}$ описывается уравнением:

$$\frac{d\text{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{\text{O}_2}} \cdot e^{-86000/(RT)} \cdot (\text{O}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \frac{64}{3}) \cdot e^{-43000/(RT)} \quad (6)$$

где τ - время, с; NO, N_2 , O_2 - концентрация оксида азота, азота и кислорода, г·моль/л.

Образование топливных NO происходит на начальном участке факела, на стадии выгорания летучих, при наличии в зоне реакции достаточного количества кислорода уже при температурах 850...1100 К. Интенсивность этого процесса тем выше, чем выше температура и содержание азота в топливе. С ростом содержания азота в топливе выход NO_x увеличивается, а степень превращения азота топлива в NO_x - снижается. Достигнув определенного значения, концентрация топливных оксидов азота в дальнейшем по ходу факела не изменяется.

Определение концентрации топливных NO_x (г/м³), проводилось по

Рис. 1. Схема трехступенчатого сжигания топлива.

I - основная зона горения; II - восстановительная зона горения; III - зона дожигания; 1-3 - регулирование вторичного воздуха в основную, восстановительную зоны горения и зону дожигания; 4 - топка; 5, 6 - регулирование частоты вращения пылепитателей в основную и восстановительную зоны горения; 7 - мельничные вентиляторы, 8 - воздух из корба вторичного воздуха.

зависимости [4], учитывающей влияние избытка воздуха в горелках и степени рециркуляции газов:

$$\text{NO}_{\text{мон}} = 1,25(0,40 - 0,1N^r) N^r \left(\frac{1,2 + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_{\text{max}} - 800}{1000} \right)^{0,33} \quad \text{при } 800 \leq T_{\text{max}} < 1850 \text{ К, (7)}$$

где N^r - содержание азота в рабочей массе топлива, %; T_{\max} - максимальная температура в топке, К; r - степень рециркуляции газов, % (принималась равной нулю).

Расчет выгорания полидисперсного пылеугольного факела проводился по методике, подробно описанной в [2] при введении суммарных характеристик полидисперсности пыли в основные уравнения выгорания топлива и модифицированной применительно к ступенчатому сжиганию.

Изменение температуры по высоте факела определялось по формуле, предложенной А.М Гурвичем и А.Г. Блохом:

$$\Theta = \left(e^{-\alpha Z} - A e^{-\beta Z} \right)^{1/4}, \quad (8)$$

применительно к ступенчатому сжиганию записанной в виде:

$$\Theta = \left(e^{-\alpha Z} - A e^{-\beta Z} \right)^{1/4} \cdot b_I + \left(e^{-\alpha(Z-Z_{\max_дон})} - A e^{-\beta(Z-Z_{\max_дон})} \right)^{1/4} \cdot b_{II} \quad (9)$$

где: z – относительное расстояние от места ввода топлива; Z_{\max} - положение максимума температуры в топочной камере; $A=1 - \Theta_0^4$; α и β - опытные коэффициенты, принятые по [2]; Θ_0 - безразмерная температура на входе в топку.

Распределение частиц исходной пыли по фракциям описывалось формулой Розина-Раммлера-Беннета:

$$R_{0i} = e^{-b\delta_{0i}^n} \quad (10)$$

где: b и n – опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава [2]. Размер самой крупной частицы определяется соотношением:

$$\delta_{01} = (6,9/b)^{1/n}. \quad (11)$$

Результатом расчета выгорания полидисперсного пылеугольного факела явилось значение неполноты сгорания топлива по высоте топочной камеры, и вычисленная через нее величина поверхности реагирующих с NO_x коксовых частиц (оставшихся к моменту времени τ) по выражению:

$$F = \frac{6mn}{\rho_k \delta_{01}} \int_{1-x}^1 e^{-my^n} \frac{(x+y-1)^2}{y^3} dy, \quad (12)$$

где: ρ_k – плотность кокса, кг/м^3 ; $x = \delta_1/\delta_{01}$ – относительный размер наиболее крупной частицы; $y = \delta_{0i}/\delta_{01}$ – отношение начального размера частицы i -ой фракции к начальному размеру наиболее крупной частицы; $m=6,9$ - параметр, выбранный согласно рекомендациям [2], n - показатель полидисперсности.

Расход углерода по реакции (1) (количество разложившихся NO) с поверхности реагирующих частиц определялся следующим выражением:

$$G_{C+NO} = \frac{\alpha_D}{RT} \left(\frac{N}{1+N} P_{\text{NO}\Delta} \right), \quad (13)$$

где $N = k/\alpha_D$ - диффузионно-химический критерий реакции (1).

В расчет выгорания кокса оно не включалось ввиду малости величины константы скорости реакции (1) в сравнении с реакцией:



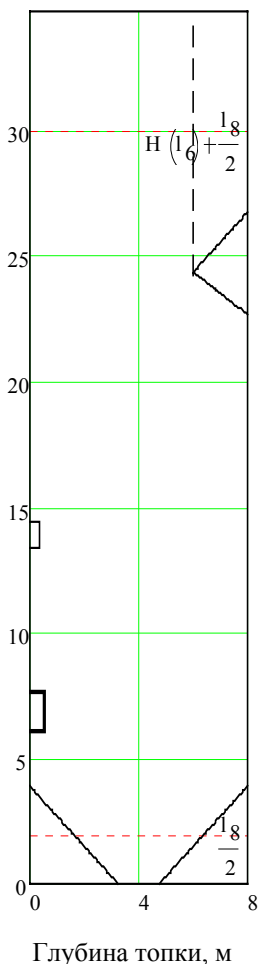


Рис. 2. Эскиз котла Еп-620-14.0-560-560

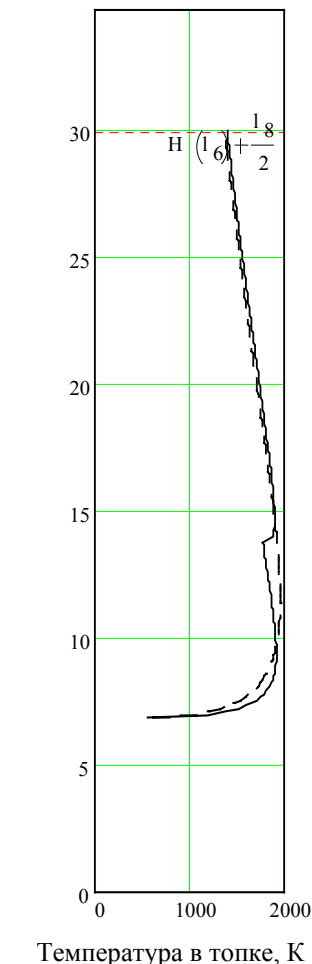


Рис. 3. Профиль температуры по высоте топочной камеры:
 — при двухступенчатом сжигании;
 - - - при одноступенчатом сжигании.

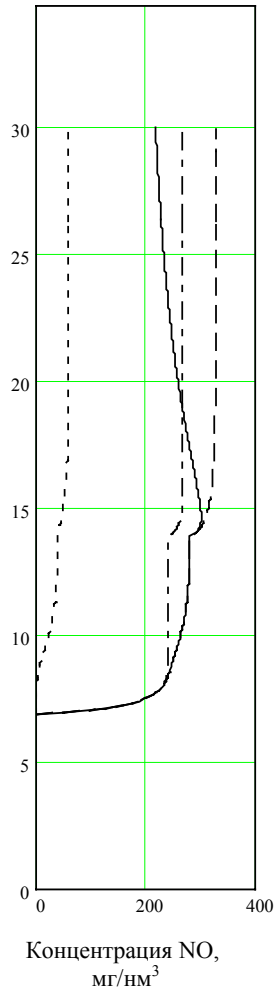


Рис. 4. Изменение концентрации оксидов азота по высоте топочной камеры при двухступенчатом сжигании топлива:
 ··· - термические NO;
 — · — топливные NO;
 — — суммарные NO;
 — — изменение концентрации NO с учетом разложения

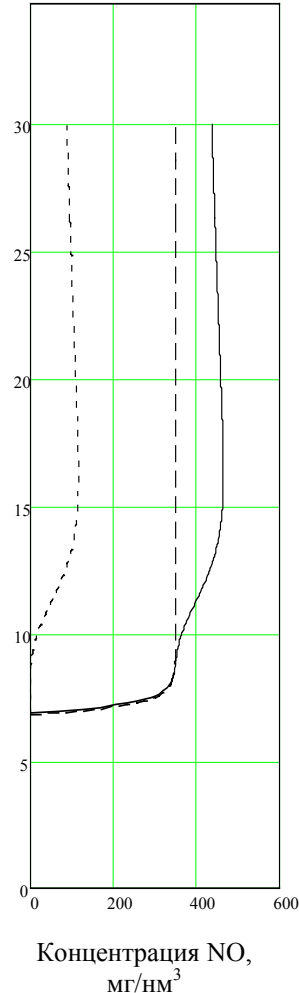


Рис. 5. Изменение концентрации оксидов азота по высоте топочной камеры при одноступенчатом сжигании топлива:
 ··· - термические NO;
 - · - топливные NO;
 — — суммарные NO.

По приведенной выше методике проведен расчет выгорания полифракционного пылеугольного факела и оценка степени разложения оксидов азота на углероде кокса вторичного топлива при организации ступенчатого сжигания кузнецкого каменного (2СС) угля ($R_{90}=25\%$, $R_{200}=5\%$, $(\delta_{01\text{очн}}=474,8 \text{ мкм})$) в котле Еп-620-14.0-560-560, (рис. 2), для которого предварительно был проведен полный тепловой расчет. Для сравнения результатов был произведен расчет одноступенчатого сжигания того же топлива в том же котле. Профиль температур по высоте топки, рассчитанный по зависимостям (8) и (9), показан на рис. 3.

Расчет выгорания первичного и вторичного топлива проводился при соотношении расходов в первый и дополнительный яруса горелок $V_1/V_{II}=0,9/0,1$. В результате получены графики зависимостей генерации и разложения NO_x по высоте топки. Так, при характеристиках полидисперсности дополнительного топлива $R_{90}=15\%$, $R_{200}=0,5\%$, $(\delta_{01\text{доп}}=245,6 \text{ мкм})$, степень разложения оксидов азота достигает 37 % по сравнению со случаем без разложения (рис. 4), при увеличении механического недожога на 0,051 %. При одноступенчатом сжига-

нии топлива в том же котле (рис. 5), конечные концентрации NO_x выше в 2 раза, чем при ступенчатом сжигании. Эти результаты весьма удовлетворительно согласуются с данными Бабия В.И. [5].

Результаты расчета по разработанной методике показывают, что при трехступенчатом сжигании топлива достигается значительное (до 50 %) снижение содержания NO_x в дымовых газах на выходе из топки и оно может рассматриваться как один из эффективных методов борьбы с генерацией оксидов азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 144 с.
2. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М.Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.
3. Tang V.G., Ohtake K. Computer simulation of NO formation in pulverized coal combustion // International symposium on coal combustion (7 – 10 sept. 1987): China, 1987. - S. 1.
4. Безгрешнов А.Н. и др. Расчет паровых котлов в примерах и задачах: Уч. пособ. / А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липов, Б.М. Шлейфер; Под общ. Ред. Ю.М. Липова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
5. Бабий В.И. Методика расчета трехступенчатого сжигания топлива в топках котлов // Теплоэнергетика. 1997. № 9. С. 64-68.