

М. А. Таймаров, Д. Е. Чикляев

ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА

Ключевые слова: теплоэнергетика, тепловые электрические станции, паровой котел, оксид азота, загрязнение воздуха, пиролизный газ.

В работе приведена методика расчета концентрации термических оксидов азота при сжигании твердых, жидких и газообразных видов топлива.

Keywords: heat energy, heat electric stations, steam caldron, nitrogen dioxide, air pollution, pyrolysis gas.

In the work of the method of determination of concentration of thermal nitrogen oxides in the combustion of solid, liquid and gaseous kinds of fuel.

Введение

В топках паровых котлов при горении топлива образуются оксиды азота двух типов – оксид NO и диоксид NO₂, причем на выходе из дымовых труб оксид NO составляет до 95 % суммы оксидов NO_x = NO + NO₂. Доокисление NO до NO₂ происходит в атмосфере в процессе распространения дымового факела свободным кислородом (озоном) воздуха. Поэтому массовый выброс оксидов азота из котлов рассчитывается по NO₂. В газовых выбросах ТЭС их концентрация составляет 0,2 – 1,2 г/м³.

Оксиды азота образуются при сгорании топлива в ядре факела тремя возможными путями:

– *топливные* – образуются при температуре газовой среды 800 – 2100 К за счет азота, входящего в топливо (N^p);

– *термические* – образуются при высоких температурах факела (более 1600 К) за счет окисления азота воздуха;

– *быстрые* – образуются при контакте промежуточных углеводородных соединений топлива (при сжигании газа и мазута) с азотом поступающего в горелки воздуха в начальной зоне горения факела при температурах выше 1000 К.

1. Расчет образования термических оксидов азота

Определяющими характеристиками при образовании термических оксидов являются максимальная температура факела T_м и температурный интервал реакции ΔT_р. Расчетное значение T_м зависит от условной адиабатной температуры в зоне горения T'_а:

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_g^0 c_g + 1,016(\alpha_{гор} - 1)V_b^0 c_b} + 273, \quad (1)$$

где Q'_T = Q_н^p · 10³ + Q_{г.в} + Q – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг; Q_н^p – теплота сгорания, МДж/кг; c_г и c_в – теплоемкости газа и воздуха, полученные при ожидаемой адиабатной температуре, кДж/(м³·К); α_{гор} – избыток воздуха в зоне горения; принимается при наличии присосов

воздуха в топку Δα_т следующим: α_{гор} = α_т – 0,5Δα_т, для газоплотных котлов α_{гор} = α_т.

Эффект рециркуляции газов на температурный уровень учитывается при расчете максимальной температуры факела T_м.

Средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха определяется по формулам:

– при сжигании твердого топлива

$$c_r = (1,59 + 0,004W^p) + 0,14k_t; \quad (2)$$

– при сжигании природного газа

$$c_r = 1,57 + 0,134k_t; \quad (3)$$

– при сжигании мазута

$$c_r = 1,58 + 0,122 k_t, \quad (4)$$

где W^p = W^p / Q_н^p – приведенная влажность топлива, %кг/МДж; k_t = (t_a – 1200)/1000 – температурный коэффициент изменения теплоемкости; t_a – ожидаемая адиабатная температура, °С.

Теплоемкость воздуха при высоких температурах:

$$c_b = 1,46 + 0,092k_t. \quad (5)$$

Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам:

– для твердого топлива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} (1 + 10^{-5} Q'_T); \quad (6)$$

– для мазута и природного газа

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} (1 + 0,36^{-5} Q'_T). \quad (7)$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой t_a и полученным по значением (T'_а – 273) не должно превышать 50 °С,

иначе необходимо принять новое $t_a = T'_a - 273$ и уточнить значения C_r и C_b .

Максимальную температуру зоны горения находят по формуле с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции газов:

$$T_m = \beta_{cr} T'_a (1 - \psi_{3,r})^{0,25} (1 - r^{1+nr}) m_r, \quad (8)$$

где β_{cr} – доля сгоревшего топлива на участке от выхода из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения; значения β_{cr} принимать: для твердых топлив 0,95–0,97 (большие значения для реакционных топлив), для природного газа и мазута 0,97 – 0,99; $\psi_{3,r}$ – коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела, при необходимости усреднения тепловосприятия экранов принимать верхнюю границу зоны горения на 1,5 м выше верхнего яруса горелок; r – доля рециркуляции газов в зону горения; n – коэффициент, учитывающий способ ввода рециркулирующих газов в топку: $n = 6,5$ – при вводе через сопла под горелки, $n = 5,0$ – при вводе через кольцевой канал вокруг горелки $n = 3,0$ – при смешении газов с горячим воздухом до горелки, либо при вводе между центральным и периферийным каналами горелки; T_r – коэффициент, учитывающий тип горелки: $T_r = 1$ – для вихревых настенных горелок; $T_r = 0,95(25 / w_b)^{0,2}$ – для прямоточных настенных горелок, где w_b – скорость воздуха на выходе из горелки, м/с; $T_r = 0,985$ – для подовых горелок с прямоточно-вихревой подачей воздуха.

Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксида азота NO при температуре реакции T_m :

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_m - 23). \quad (9)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_t} \left(\frac{q_f \Pi}{300} \right)^{0,5} \tau_{преб}, \quad (10)$$

где ΔT_p – температурный интервал активной реакции образования оксидов азота, зависит от значения T_m и определяется из выражения:

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_m \cdot 10^{-5}}; \quad (11)$$

$q_f = \frac{BQ_H^p}{a_t b_t}$ – среднее тепловое напряжение сечения

топочной камеры, МВт / м²; $\Pi = 2a_t + 2b_t$ – расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина); T''_t – абсолютная температура газов на выходе из топки,

берется из теплового расчета котла; $\tau_{преб}$ – время пребывания газов в топочной камере, с:

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{q_v T_r v_r^n \alpha_r (1+r)}, \quad (12)$$

где $q_v = \frac{BQ_H^p}{V_t}$ – тепловое напряжение топочного

объема, МВт/м³; $T_r = 0,84[(T_m)^4 + (T'_t)^4]^{0,25}$ – средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К; v_r^n – удельный приведенный объем газов при $\alpha = 1$, м³/МДж, в расчетах следует принимать для антрацита и полуантрацита $v_r^n = 0,273$ м³/МДж, для остальных твердых топлив $v_r^n = 0,278 + 0,001 W^{11}$, для мазута 0,281 м³/МДж, для природного газа 0,3 м³/МДж; ξ – коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов, при встречных вихревых грелках $\xi = 0,8$, то же для однофронтального расположения – 0,75, для тангенциального расположения прямоточных горелок – 0,70, для подовых горелок – 0,90.

Концентрация оксидов азота, образующихся за счет термической реакции в зоне ядра факела, в пересчете на диоксид азота NO_2^{tr} , г/м³, определяется по формуле:

$$NO_2^{tr} = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} \exp(-10860/T_m) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (13)$$

где C_{O_2} – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции, кг/м³, определяется по формуле:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_B^0 [(\alpha_{гор} - 1) + r(\alpha_{rc} - \alpha_{гор})] p_{O_2}}{[V_r^0 + (\alpha_{гор} - 1) V_B^0] (1+r)}, \quad (14)$$

где α_{rc} – избыток воздуха в газах рециркуляции; $\rho_{O_2} = 1,428$ кг/м³ – плотность кислорода при атмосферном давлении. В случаях, когда значение $\alpha_{гор} - 1$ окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02 [1].

2. Экспериментальная часть

Ниже приводятся результаты расчета интенсивности образования окислов азота при работе котла на природном и пиролизном газах [2]. В расчете предусматривается ввод газов рециркуляции для снижения температуры продуктов горения в котле ПК-47. При расчете тепловыделения в топке учитывалось тепло, вносимое в топку с нагретым воздухом. Низшая теплота сгорания природного газа принималась равной 8966 ккал/м³ и 8200 ккал/м³ для пиролизного газа.

График зависимости образования окислов азота от температуры продуктов сгорания для котла

ПК-47 при доле рециркуляции 0,1 при сжигании природного и пиролизного газов, приведен на рис. 1.

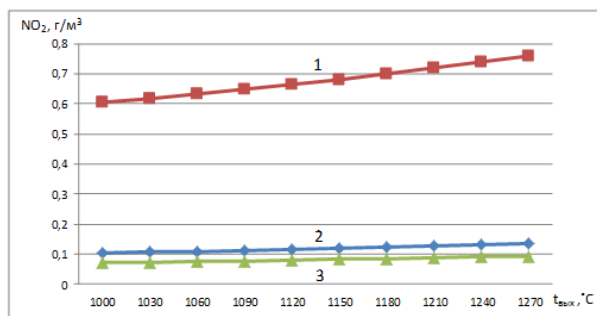


Рис. 1 - Зависимость выхода термических окислов азота NO_2 от температуры продуктов сгорания на выходе из топki $t_{\text{вых}}$ для котла ПК-47 при доле рециркуляции 0,1 для сжигания при $\alpha=1,15$: 1 - природного газа с низшей теплотой сгорания 8966 ккал/м³; 2 - пиролизного газа с низшей теплотой сгорания 8200 ккал/м³; 3 - для котла ТГМ-84Б при теплоте сгорания природного газа 8060 ккал/м³

На рис. 2 приведен график зависимости образования окислов азота от избытка воздуха в газах рециркуляции для котла ПК-47 при доле рециркуляции 0,1 при сжигании пиролизного газа. Температура газов на выходе из топki 1210 $^\circ\text{C}$.

Как видно из графиков (см. рис. 1,2), при сжигании природного и пиролизного газов наиболее сильно образование термических окислов азота

зависит от теплоты сгорания топлива; при снижении значений избытка воздуха в газах рециркуляции и температуры газов на выходе из топki образование окислов азота замедляется.

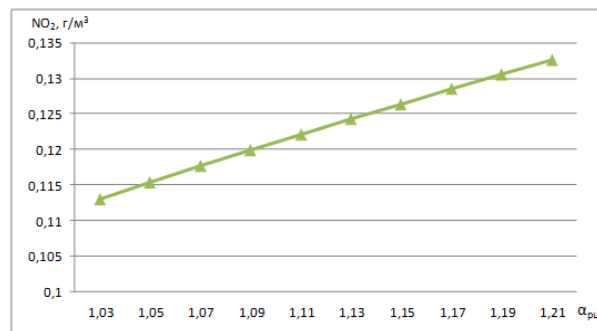


Рис. 2 - Зависимость образования термических окислов азота NO_2 от избытка воздуха в газах рециркуляции при сжигании пиролизного газа

Литература

1. М. А. Таймаров, В кн. *Дымовые трубы котельных агрегатов*. Казанский Государственный Энергетический Университет, Казань, 2012. С. 62-66.
2. М.А. Таймаров, В кн. *Разработка и внедрение рекомендаций по снижению выбросов окислов азота для котла ПК-47 с определением теплоты сгорания топлива посредством бомбового калориметра*. Казанский Государственный Энергетический Университет, Казань, 2013. С. 38-41.