

Введение В топках паровых котлов при горении топлива образуются оксиды азота двух типов – оксид NO и диоксид NO<sub>2</sub>, причем на выходе из дымовых труб оксид NO составляет до 95 % суммы оксидов NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>. Доокисление NO до NO<sub>2</sub> происходит в атмосфере в процессе распространения дымового факела свободным кислородом (озоном) воздуха. Поэтому массовый выброс оксидов азота из котлов рассчитывается по NO<sub>2</sub>. В газовых выбросах ТЭС их концентрация составляет 0,2 – 1,2 г/м<sup>3</sup>. 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<sub>p</sub>); – 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 и температурный интервал реакции ΔT<sub>р</sub>. Расчетное значение T<sub>м</sub> зависит от условной адиабатной температуры в зоне горения : (1) где  $T_{ad} = \frac{Q_{г.в} + Q_{п}}{c_{г} + \alpha_{гор} c_{в}}$  – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг; –теплота сгорания, МДж/кг; c<sub>г</sub> и c<sub>в</sub> – теплоемкости газа и воздуха, полученные при ожидаемой адиабатной температуре, кДж/(м<sup>3</sup>×К); α<sub>гор</sub> – избыток воздуха в зоне горения; принимается при наличии присосов воздуха в топку Dat следующим: α<sub>гор</sub> = α<sub>т</sub> – 0,5Dat, для газоплотных котлов α<sub>гор</sub> = α<sub>т</sub>. Эффект рециркуляции газов на температурный уровень учитывается при расчете максимальной температуры факела T<sub>м</sub>. Средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха определяется по формулам: – при сжигании твердого топлива c<sub>г</sub> = (1,59 + 0,004W<sub>п</sub>) + 0,14kt ; (2) – при сжигании природного газа c<sub>г</sub> = 1,57 + 0,134kt ; (3) – при сжигании мазута c<sub>г</sub> = 1,58 + 0,122 kt, (4) где W<sub>п</sub> = W<sub>р</sub> / – приведенная влажность топлива, %кг/МДж; kt = (t<sub>a</sub> – 1200)/1000 – температурный коэффициент изменения теплоемкости; t<sub>a</sub> –ожидаемая адиабатная температура, °С. Теплоемкость воздуха при высоких температурах: c<sub>в</sub> = 1,46 + 0,092kt. (5) Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам: – для твердого топлива (6) – для мазута и природного газа (7) Допустимое расхождение между предварительно принятой t<sub>a</sub> и полученным по значением ( – 273) не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принять новое t<sub>a</sub> = – 273 и уточнить значения c<sub>г</sub> и c<sub>в</sub>. Максимальную температуру зоны горения находят по формуле с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции газов: T<sub>м</sub> = bс<sub>г</sub> (1 – уз.г)0,25(1 – r<sub>1</sub>+nr)m<sub>г</sub> , (8) где bс<sub>г</sub> – доля сгоревшего топлива на участке от выхода из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения; значения bс<sub>г</sub> принимать: для твердых топлив 0,95–0,97 (большие значения для реакционных топлив), для природного газа и мазута 0,97 – 0,99; уз.г –

коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела, при необходимости усреднения тепловосприятости экранов принимать верхнюю границу зоны горения на 1,5 м выше верхнего яруса горелок;  $\gamma$  – доля рециркуляции газов в зону горения;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий способ ввода рециркулирующих газов в топку:  $\eta = 6,5$  – при вводе через сопла под горелки,  $\eta = 5,0$  – при вводе через кольцевой канал вокруг горелки  $\eta = 3,0$  – при смешении газов с горячим воздухом до горелки, либо при вводе между центральным и периферийным каналами горелки;  $\eta_g$  – коэффициент, учитывающий тип горелки:  $\eta_g = 1$  – для вихревых настенных горелок;  $\eta_g = 0,95(25 / w_b)^{0,2}$  – для прямоточных настенных горелок, где  $w_b$  – скорость воздуха на выходе из горелки, м/с;  $\eta_g = 0,985$  – для подовых горелок с прямоточно-вихревой подачей воздуха. Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксида азота NO при температуре реакции  $T_m$ :  $t_0 = 0,024 \exp(54290 / T_m - 23)$ . (9) Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке: (10) где  $\Delta T_p$  – температурный интервал активной реакции образования оксидов азота, зависит от значения  $T_m$  и определяется из выражения: (11) – среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт / м<sup>2</sup>;  $P = 2a_t + 2b_t$  – расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина);  $T_{\text{вых}}$  – абсолютная температура газов на выходе из топки, берется из теплового расчета котла;  $t_{\text{пр}}$  – время пребывания газов в топочной камере, с: (12) где  $q_v$  – тепловое напряжение топочного объема, МВт/м<sup>3</sup>;  $T_g = 0,84[(T_m)^4 + (T_{\text{вых}})^4]^{0,25}$  – средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К;  $v_g$  – удельный приведенный объем газов при  $a = 1$ , м<sup>3</sup>/МДж, в расчетах следует принимать для антрацита и полуантрацита = 0,273 м<sup>3</sup>/МДж, для остальных твердых топлив = 0,278 + 0,001  $W_{H_2}$ , для мазута 0,281 м<sup>3</sup>/МДж, для природного газа 0,3 м<sup>3</sup>/МДж;  $\chi$  – коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов, при встречных вихревых горелках  $\chi = 0,8$ , 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, г/м<sup>3</sup>, определяется по формуле: (13) где  $C_{O_2}$  – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции, кг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле: (14) где  $\Delta p_{O_2}$  – избыток воздуха в газах рециркуляции;  $\rho_{O_2} = 1,428$  кг/м<sup>3</sup> – плотность кислорода при атмосферном давлении. В случаях, когда значение  $a_{\text{гор-1}}$  окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02 [1]. 2.

Экспериментальная часть Ниже приводятся результаты расчета интенсивности образования оксидов 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/м<sup>3</sup> и 8200 ккал/м<sup>3</sup> 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<sub>2</sub> от температуры продуктов сгорания на выходе из топki твх для котла ПК-47 при доле рециркуляции 0,1 для сжигания при  $\alpha=1,15$ : 1 - природного газа с низшей теплотой сгорания 8966 ккал/м<sup>3</sup>; 2 - пиролизного газа с низшей теплотой сгорания 8200 ккал/м<sup>3</sup>; 3 - для котла ТГМ-84Б при теплоте сгорания природного газа 8060 ккал/м<sup>3</sup> 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°С. 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<sub>2</sub> от избытка воздуха в газах рециркуляции при сжигании пиролизного газа