

## 5.1. РАСЧЕТЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

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<sup>p</sup>);

*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.

По указаниям п. 5.1.1 и 5.1.2 определяют оксиды азота при сжигании твердого топлива и мазута, особенности расчета оксидов азота из природного газа изложены в п. 5.1.3.

### 5.1.1. Образование термических оксидов азота

Определяющими характеристиками при образовании термических оксидов являются максимальная температура факела  $T_m$  и температурный интервал реакции  $\Delta T_p$ . Расчетное значение  $T_m$  зависит от условной адиабатной температуры в зоне горения  $T'_a$ :

$$T'_a = \frac{Q'_T}{V_T^0 c_T + 1,016(\alpha_{гор} - 1) V_B^0 c_B} + 273, \quad (5.1)$$

где  $Q'_T = Q_H^p \cdot 10^3 + Q_{г.в} + Q_{i.г}$  — тепловыделение в зоне горения, кДж/кг;  $Q_H^p$  — теплота сгорания, МДж/кг;  $c_T$  и  $c_B$  — теплоемкости газа и воздуха, полученные при ожидаемой адиабатной температуре, кДж/(м<sup>3</sup> · К);  $\alpha_{гор}$  — избыток воздуха в зоне горения; принимается при наличии присосов воздуха в топку  $\Delta\alpha_T$  следующим:  $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$ , для газоплотных котлов  $\alpha_{гор} = \alpha_T$ .

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

Средняя теплоемкость продуктов сгорания и воздуха определяется по формулам:

при сжигании твердого топлива

$$c_t = (1,59 + 0,004W^n) + 0,14k_t; \quad (5.2a)$$

при сжигании природного газа

$$c_t = 1,57 + 0,134k_t; \quad (5.2b)$$

при сжигании мазута

$$c_t = 1,58 + 0,122k_t, \quad (5.2b)$$

где  $W^n = W^p / Q_p^p$  — 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

$$c_b = 1,46 + 0,092k_t. \quad (5.3)$$

Ожидаемую адиабатную температуру для расчета теплоемкостей находят по формулам:

для твердого топлива

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} (1 + 10^{-5} Q_t); \quad (5.4a)$$

для мазута и природного газа

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} Q_t). \quad (5.4b)$$

Допустимое расхождение между предварительно принятой  $t_a$  и полученным по (5.1) значением  $(T'_a - 273)$  не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принять новое  $t_a = T'_a - 273$  и уточнить значения  $c_t$  и  $c_b$ .

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

$$T_m = \beta_{сг} T'_a (1 - \psi_{э,1})^{0,25} (1 - r^{1-nr}) m_t, \quad (5.5)$$

где  $\beta_{сг}$  — доля сгоревшего топлива на участке от выхода из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения; значения  $\beta_{сг}$  принимать: для твердых топлив 0,95—0,97 (большие значения для реакционных топлив), для природного газа и мазута 0,97—0,99;  $\psi_{э,1}$  — коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела (см. § 4.1), при необходимости усреднения тепловосприятости 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 горелками;  $n=5,0$  — при вводе через кольцевой канал вокруг горелки;  $n=3,0$  — при смешении газов с горячим воздухом до горелки либо вводе между центральным и периферийным каналами горелки;  $m_r$  — коэффициент, учитывающий тип горелки:  $m_r=1$  — для вихревых настенных горелок;  $m_r=0,95(25/w_b)^{0,2}$  — для прямооточных настенных горелок, где  $w_b$  — скорость воздуха на выходе из горелки, м/с;  $m_r=0,985$  — для подовых горелок с прямооточно-вихревой подачей воздуха.

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

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54\,290/T_m - 23). \quad (5.6)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_r} \left( \frac{q_f H}{300} \right)^{0,5} \tau_{прсб}, \quad (5.7)$$

где  $\Delta T_p$  — температурный интервал активной реакции образования оксидов азота, К, зависит от значения  $T_m$  и определяется из выражения

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_m \cdot 10^{-5}}; \quad (5.8)$$

$q_f = \frac{BQ_p}{a_r b_r}$  — среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт/м<sup>2</sup>;  $H = 2a_r + 2b_r$  — расчетный периметр стен призматической топочной камеры, м (при наличии двусветного экрана добавляется его удвоенная ширина);  $T''_r$  — абсолютная температура газов на выходе из топки, К, берется из теплового расчета котла;  $\tau_{прсб}$  — время пребывания газов в топочной камере, с:

$$\tau_{прсб} = \frac{273\xi}{q_v \bar{T}_r v_r'' \alpha (1+r)}, \quad (5.9)$$

где  $q_v = \frac{BQ_p}{V_r}$  — тепловое напряжение топочного объема, МВт/м<sup>3</sup>;  $\bar{T}_r = 0,84 [(T_m)^4 + (T''_r)^4]^{0,25}$  — средняя расчетная температура газов в топочном объеме, К;  $v_r''$  — удельный приведенный объем газов при  $\alpha=1$ , м<sup>3</sup>/МДж; в расчетах следует принимать для антрацита и полуантрацита  $v_r''=0,273$  м<sup>3</sup>/МДж, для остальных твердых топлив  $v_r''=0,278+0,001W''$ , для мазута 0,281 м<sup>3</sup>/МДж, для природного газа 0,3 м<sup>3</sup>/МДж;  $\xi$  — коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов, при встречных вихревых горелках  $\xi=0,8$ , то же для

однофронтального расположения 0,75, для тангенциального расположения прямооточных 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  $\text{NO}_2^{\text{TP}}$ ,  $\text{г/м}^3$ , определяется по формуле

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = 7,03 \cdot 10^3 C_{\text{O}_2}^{0,5} \exp(-10860/T_m) \frac{T_p}{\tau_0}, \quad (5.10)$$

где  $C_{\text{O}_2}$  — концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции,  $\text{кг/м}^3$ , определяется по формуле

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 V_{\text{в}}^0 [(\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{гор}})] \rho_{\text{O}_2}}{[V_{\text{г}}^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_{\text{в}}^0] (1 + r)}, \quad (5.11)$$

где  $\alpha_{\text{пр}}$  — избыток воздуха в газах рециркуляции;  $\rho_{\text{O}_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$  — плотность кислорода при атмосферном давлении. В случаях, когда значение  $\alpha_{\text{гор}} - 1$  окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02.

### 5.1.2. Концентрации топливных и быстрых оксидов азота. Суммарная концентрация оксидов в газах

Образование этого вида оксидов происходит в диапазоне температур 800—2100 К и наибольшую интенсивность имеет в области 1850 К. Выход топливных оксидов  $\text{NO}_2^{\text{TP}}$  в этой зоне сильно зависит от избытка воздуха (в степени 2), слабо от температуры (степень 0,33) и содержания азота в топливе  $N^{\text{P}}$ .

Расчетные формулы для двух температурных зон имеют следующий вид:

при значениях температуры  $2100 > T_m \geq 1850 \text{ К}$

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = (0,40 - 0,1N^{\text{P}}) N^{\text{P}} \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{2100 - T_m}{125} \right)^{0,33}; \quad (5.12)$$

при значениях температуры  $1850 > T_m > 800 \text{ К}$

$$\text{NO}_2^{\text{TP}} = 1,25 (0,40 - 0,1N^{\text{P}}) N^{\text{P}} \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T_m - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (5.13)$$

Формулы (5.12) и (5.13) учитывают одновременно и образование быстрых оксидов азота.

В итоге максимальная суммарная концентрация оксидов азота при номинальной нагрузке котла составляет

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{TP}} + \text{NO}_2^{\text{БП}}. \quad (5.14)$$

При любой сниженной нагрузке парового котла суммарный выход оксидов азота определяется по формуле

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{TP}} (D/D_{\text{ном}}) + \text{NO}_2^{\text{БП}} (D/D_{\text{ном}})^{0,5}. \quad (5.15)$$

Здесь  $D/D_{\text{ном}}$  — отношение расчетной нагрузки котла к номинальной.

При переходе на двухступенчатое (нестехиометрическое) сжигание топлива расчет максимальной температуры факела  $T_m$  производится по формуле (5.5) для первой (нижней) зоны горения топлива. Избыток воздуха в горелках первой зоны определяется заданным распределением поступления воздуха по зонам и аналогичным распределением топлива и определяется по формуле

$$\alpha_{\text{гор}}^I = \frac{\alpha_r - 0,5\Delta\alpha_r - \beta_{II}}{\bar{B}_1}, \quad (5.16)$$

где  $\beta_{II}$  — доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения;  $\bar{B}_1 = B_1/B$  — доля топлива, поступающего в первую зону. При наличии сбросных горелок с учетом КПД циклона  $\bar{B}_1 = 0,88 \div 0,94$ . Расчетный избыток воздуха в горелках второй зоны горения

$$\alpha_{\text{гор}}^{II} = \beta_{II} + 0,5\Delta\alpha_r. \quad (5.17)$$

Доля топлива, сгоревшего в первой (нижней) зоне горения, определяется относительным количеством воздуха в первой зоне с учетом неизбежной неполноты сгорания:

$$\beta_{\text{ст}}^I = 0,95\alpha_{\text{гор}}^I. \quad (5.18)$$

Расчет температуры  $T_m$  осуществляют по (5.5) для значения  $\beta_{\text{ст}}^I$ . Адиабатная температура горения определяется по (5.1) для полного избытка воздуха на выходе из верхней области горения, т. е. по  $\alpha_{\text{гор}} = \alpha_r - 0,5\Delta\alpha_r$  независимо от ступенчатой организации сжигания. В остальном расчет совпадает с изложенным ранее.

### 5.1.3. Особенности расчета оксидов азота при сжигании природного газа

Сжигание природного газа характеризуется более быстрым протеканием реакций горения. В результате сокращается зона активного горения и растет максимальная температура. Поэтому в большинстве случаев (при других равных условиях) концентрация оксидов азота получается несколько выше, чем при сжигании мазута (приблизительно  $\text{NO}_2^{\text{ак}} = 1,3\text{NO}_2^{\text{мз}}$ ). Ввиду отсутствия в природном газе топливного азота, входящего в радикалы, но при наличии углеводородных соединений при сгорании газа могут образовываться только быстрые оксиды азота  $\text{NO}_2^{\text{б}}$ .

При расчете термических оксидов азота следует исходить из методики, изложенной в п. 5.1.1. Расчет максимальной

температуры производится по (5.5), но для учета повышенной скорости реакций горения вводится поправка и расчетная температура принимается

$$T'_M = 1,01 T_M, \quad (5.19)$$

где  $T_M$  — максимальная температура по (5.5), К.

Расчет быстрых оксидов азота осуществляется по формуле

$$\text{NO}_2^6 = 0,1 \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T'_M - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (5.20)$$

Ввиду высокой реакционной способности газового топлива рециркуляция газов  $r$  не учитывается в формуле (5.5) при вводе газов через шлицы. Суммарная концентрация оксидов азота составит

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{rp}} + \text{NO}_2^6. \quad (5.21)$$

## ПРИМЕРЫ

**Пример 5.1.** Определить ожидаемый выход оксидов азота из котла Пп-1000-25-545 К (ТПП-312А) при сжигании донецкого ГСШ с жидким шлакоудалением и природного газа. При расчете принять следующие исходные данные:

|  | Донецкий ГСШ                                     | Природный газ                                    |
|--|--|--|
| Теплота сгорания .....                   | $Q_{\text{г}}^{\text{г}} = 20,47 \text{ МДж/кг}$ | $Q_{\text{г}}^{\text{г}} = 37,3 \text{ МДж/м}^3$ |
| Температура горячего воздуха .....       | 384 С  | 370 С  |
| Доля рециркуляции газов .....            | —  | 0,1  |
| Избыток воздуха на выходе из топки ...   | 1,15   | 1,10   |
| То же в газах рециркуляции .....         | —  | 1,17   |
| Температура газов на выходе из топки ... | 1190 С   | 1210 С   |
| Тепловое напряжение сечения .....        |  | $q_{\text{г}} = 4,86 \text{ МВт/м}^2$            |
| Периметр топочной камеры .....           |  | $H = 51,9 \text{ м}$                             |
| Присос холодного воздуха в топку         |  | $\Delta\alpha_{\text{г}} = 0,1$                  |

**Решение.** По исходным данным из табл. П1 и П2 приложения находим: для твердого топлива  $V_{\text{г}}^0 = 6,28 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $V^0 = 5,83 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; для природного газа  $V_{\text{г}}^0 = 11,16 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $V^0 = 9,96 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;

1. Энтальпия горячего воздуха — по (4.22):

для твердого топлива  $Q_{\text{г.в}} = 0,95 \cdot 3030,7 = 2879 \text{ кДж/кг}$ , при этом принят присос холодного воздуха в пылесистеме  $\Delta\alpha_{\text{пл}} = 0,1$ , тогда избыток горячего воздуха составит  $\alpha_{\text{г.в}} = 1,15 - 0,1 - 0,1 = 0,95$ ;

для природного газа  $Q_{\text{г.в}} = 1,0 \cdot 4992 = 4992 \text{ кДж/м}^3$ ; физическую теплоту топлива не учитываем из-за ее незначительности.

2. Расчет оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ:

ожидаемая адиабатная температура горения топлива по (5.4а)

$$Q' = 20,47 \cdot 10^3 + 2879 = 23\,349 \text{ кДж/кг};$$

$$t_a = \frac{1800}{1,1} (1 + 0,2335) = 2018 \text{ } ^\circ\text{C};$$

теплоемкости газов и воздуха при

$k_t = (2018 - 1200)/1000 = 0,818$ ; влажности топлива  $W^p = 8\%$   
и приведенной  $W^n = 8/20,47 = 0,39$ ; тогда

$$c_r = (1,59 + 0,004 \cdot 0,39) + 0,14 \cdot 0,818 = 1,706 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_n = 1,46 + 0,092 \cdot 0,818 = 1,535 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{23\,349}{6,28 \cdot 1,706 + 1,016 (1,1 - 1) 5,83 \cdot 1,535} + 273 = 2010 + 273 = 2283 \text{ К.}$$

Максимальная температура в зоне горения принимается при  $\beta_{ст} = 0,965$ , поскольку топка с жидким шлакоудалением, экраны топки в зоне горения на высоту 5,5 м футерованы карборундовой массой. Средняя тепловая эффективность зоны определяется по п. 4.1.9. Условный коэффициент загрязнения футерованной части экранов:

$$\xi_\phi = 0,53 - 0,25 \frac{1230}{1000} = 0,22;$$

$$\psi_{з.г} = \frac{0,22 \cdot 285,5 + 149,6 (0,2 + 0,45)}{285,5 + 2 \cdot 149,6} = 0,273;$$

$$T_m = 0,965 \cdot 2283 (1 - 0,273)^{0,25} = 2030 \text{ К};$$

температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_p = \frac{2030^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0203} = 64,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

расчетное время реакции в топке

$$\tau_{проб} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1810 \cdot 0,2784 \cdot 1,15} = 2,3 \text{ с};$$

средняя температура газов в топке

$$\bar{T}_r = 0,84 (2030^4 + 1463^4)^{0,25} = 1810 \text{ К.}$$

тогда

$$\tau_p = \frac{64,9}{2283 - 1463} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,3 = 0,164 \text{ с};$$

теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54\,290/2030 - 23) = 1,01 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,1 \cdot 1,428}{6,28 + 0,1 \cdot 5,83} = 0,025 \text{ кг/м}^3;$$

$$NO_2^p = 7030 \cdot 0,025^{0,5} \exp(-10860/2030) \frac{0,164}{1,01} = 0,84 \text{ г/м}^3;$$

топливные и быстрые оксиды азота; содержание азота в топливе  $N^p = 1\%$ ;

$$NO_2^{tn} = (0,40 - 0,1 \cdot 1) 1(1,1)^2 \left( \frac{2100 - 2030}{125} \right)^{0,33} = 0,30 \text{ г/м}^3;$$

суммарный выход оксидов азота при жидком шлакоудалении

$$NO_2^0 = 0,84 + 0,30 = 1,14 \text{ г/м}^3.$$

3. Расчет выхода оксидов азота при сжигании природного газа:

Ожидаемая адиабатная температура горения (без учета рециркуляции газов:  $Q'_1 = 37,3 \cdot 10^3 + 4992 = 42292 \text{ кДж/м}^3$ ;

$$\alpha_{гор} = 1,1 - 0,5 \cdot 0,1 = 1,05;$$

$$t_a = \frac{1950}{1,05} (1 + 0,36 \cdot 0,423) = 2135 \text{ }^\circ\text{C};$$

теплоемкости газов и воздуха:

$$k_t = \frac{2135 - 1200}{1000} = 0,935; \quad c_t = 1,57 + 0,134 \cdot 0,935 = 1,695 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

$$c_b = 1,46 + 0,092 \cdot 0,935 = 1,546 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)};$$

расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{42292}{11,16 \cdot 1,695 + 1,016(1,05 - 1)9,96 \cdot 1,546} + 273 = 2147 + 273 = 2420 \text{ K}.$$

Максимальная температура в зоне горения — по (5.5). При сжигании природного газа происходит некоторое выгорание футеровки стен. Принимается тепловая эффективность стен в зоне футерования  $\psi_{ct} = 0,3$ , тогда расчетная эффективность зоны горения

$$\psi_{z,г} = \frac{0,3 \cdot 285,5 + (0,2 + 0,45) 149,6}{584,7} = 0,313;$$

$$T_m = 0,97 \cdot 2420 (1 - 0,313)^{0,25} (1 - 0,1^{1 + 3,0 \cdot 0,1}) = 2030 \text{ K};$$

$$T''_m = 1,01 \cdot 2030 = 2050 \text{ K};$$



температурный интервал реакции образования оксидов азота

$$\Delta T_p = \frac{2050^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0205} = 66,3 \text{ К}; \quad T_1 = 0,84 (2050^4 + 1483^4)^{0,25} = 1814 \text{ К};$$

расчетное время реакции в топке:

$$\tau_{\text{проб}} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,155 \cdot 1814 \cdot 0,3 \cdot 1,1 (1 + 0,1)} = 2,15 \text{ с};$$
$$\tau_p = \frac{66,3}{2420 - 1483} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,15 = 0,138 \text{ с};$$

теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290/2050 - 23) = 0,78 \text{ с};$$

концентрация термических оксидов азота при

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,21 \cdot 9,96 (0,05 + 0,1 \cdot 0,12) \cdot 1,428}{(11,16 + 0,05 \cdot 9,36) \cdot 1,1} = 0,0144 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{NO}_2^{\text{тп}} = 7030 \cdot 0,0144^{0,5} \exp(-10860/2050) \frac{0,138}{0,78} = 0,735 \text{ г/м}^3;$$

быстрые оксиды азота

$$\text{NO}_2^{\text{б}} = 0,1 \left( \frac{1,05 + 0,1}{1,1} \right)^2 \left( \frac{2050 - 800}{1000} \right)^{0,33} = 0,118 \text{ г/м}^3;$$

суммарный выход оксидов азота при сжигании природного газа с рециркуляцией

$$\text{NO}_2^0 = 0,735 + 0,118 = 0,853 \text{ г/м}^3.$$

**Пример 5.2.** На том же котле (см. пример 5.1) сжигание донецкого ГСШ произвести с подачей пыли в горелки горячим воздухом, а сушильный агент в количестве  $r_{\text{с.а.}} = 0,2$  поступает в сбросные горелки на боковых стенах топки, что обеспечивает условно ступенчатую схему сжигания топлива. Определить образование оксидов азота для этой схемы, приняв для сравнения все другие параметры одинаковыми.

**Решение.** Избыток воздуха в зоне горения до смешения с потоком из сбросных горелок (условно I ступень сжигания) составит

$$\alpha_{\text{гор}}^I = \frac{1,15 - 0,05 - 0,2}{0,9} = 0,994; \text{ принять КПД циклона } 0,9, \text{ тогда}$$

$$\bar{V}_1 = 0,9;$$

$$\beta_{\text{сг}}^I = 0,95 \cdot 0,994 = 0,944.$$

Значение  $T'_a = 2283$  К. Расчетная максимальная температура:

$$T_m = 0,944 \cdot 2283 (1 - 0,273)^{0,25} = 1990 \text{ К.}$$

Температурный интервал реакции

$$\Delta T_p = \frac{1990^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,02} = 62,5 \text{ с.}$$

Расчетное время реакции в топке

$$\tau_p = \frac{62,5}{2283 - 1463} \left( \frac{4,86 \cdot 51,9}{300} \right)^{0,5} 2,3 = 0,158 \text{ с.}$$

Теоретическое время достижения равновесия

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54\,290/1990 - 23) = 1,73 \text{ с.}$$

Концентрация остаточного кислорода в первой зоне

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot 5,83 \cdot 0,02 \cdot 1,428}{6,28 + 0,02 \cdot 5,83} = 0,0055 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная концентрация термических оксидов азота

$$NO_2^{TP} = 7030 \cdot 0,0055^{0,5} \exp(-10\,860/1990) \frac{0,158}{1,73} = 0,203 \text{ г/м}^3.$$

Топливные и быстрые оксиды азота

$$NO_2^{TN} = (0,40 - 0,1)(0,994)^2 \left( \frac{2100 - 1990}{125} \right)^{0,33} = 0,278 \text{ г/м}^3.$$

Суммарный выход оксидов азота

$$NO_2^0 = 0,203 + 0,278 = 0,481 \text{ г/м}^3.$$

Выход  $NO_2$  по сравнению с исходным вариантом (одноступенчатое сжигание) составляет  $0,481/1,14 = 0,422$ , или снизился в 2,37 раза.

**Пример 5.3.** Сравнить ожидаемый выход оксидов азота из газомазутного котла Пп-1000-25-545ГМ (ТГМП-314А) при сжигании мазута с рециркуляцией газов 5 и 15% через шлицы под горелки и в кольцевой канал горелки. При расчете принять следующие исходные данные:

|   |   |
|---|---|
| Теплота сгорания мазута.....              | 39,08 МДж/кг                              |
| Температура горячего воздуха.....         | 325° С                                    |
| Избыток воздуха на выходе из топки.....   | 1,03                                      |
| Присосы в топке.....                      | 0,05                                      |
| Температура газов на выходе из топки..... | 1180° С                                   |
| Тепловое напряжение сечения.....          | 5,12 МВт/м <sup>2</sup>                   |
| Сечение топочной камеры.....              | 17,3 × 8,77 м;<br>периметр<br>P = 52,14 м |
| Тепловое напряжение топочного объема..... | 194 кВт/м <sup>3</sup>                    |

**Решение.** 1. По исходным данным из приложения, находим  $V_r^0 = 10,98 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $V_b^0 = 10,28 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; теплота горячего воздуха  $Q_{г.в} = (1,03 - 0,05) \cdot 4502 = 4411,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $Q'_1 = 39,08 \cdot 10^3 + 4411,8 = 43491,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $\alpha_{1,оп} = 1,03 - 0,5 \cdot 0,05 = 1,005$ ;

$$t_a = \frac{1950}{1,005} (1 + 0,36 \cdot 0,435) = 2244 \text{ }^\circ\text{C}; \quad k_t = (2244 - 1200) / 1000 = 1,044;$$

$$c_1 = 1,58 + 0,122 \cdot 1,044 = 1,707 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c_b = 1,46 + 1,044 \cdot 0,092 = 1,556 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

2. Расчетная адиабатная температура

$$T'_a = \frac{43492}{10,98 \cdot 1,707 + 1,016(1,005 - 1)10,28 \cdot 1,556} + 273 = 2221 + 273 = 2494 \text{ К}.$$

3. Тепловая эффективность стен зоны горения (на 1,5 м выше верхнего яруса горелок)

$$\psi_{з.г} = \frac{357,2 \cdot 0,55 + 151,7(0,1 + 0,55)}{357,2 + 2 \cdot 151,7} = 0,447.$$

4. Максимальная температура горения: при рециркуляции 5% через щлицы

$$T_{м1} = 0,98 \cdot 2494 (1 - 0,447)^{0,25} (1 - 0,05^{1 + 6,5 \cdot 0,05}) = 2070 \text{ К};$$

при рециркуляции 15%

$$T_{м2} = 2110 (1 - 0,15^{1 + 6,5 \cdot 0,15}) = 2060 \text{ К};$$

разность  $T_{м1} - T_{м2} = 10 \text{ К}$ ;

при вводе 5% рециркуляции газов в горелку

$$T_{м3} = 2110 (1 - 0,05^{1 + 3 \cdot 0,05}) = 2043 \text{ К};$$

при рециркуляции 15%

$$T_{м4} = 2110 (1 - 0,15^{1 + 3 \cdot 0,15}) = 1975 \text{ К}.$$

Разность  $T_{м3} - T_{м4} = 68 \text{ К}$ .

Как видно, ввод газов рециркуляции непосредственно в горелки более заметно снижает расчетную максимальную температуру факела и более заметно проявляется влияние степени рециркуляции на изменение оксидов азота.

5. Температурный интервал реакции

$$\Delta T_{p1} = \frac{2070^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + 0,0207} = 67,5^\circ\text{C};$$

в остальных случаях:  $\Delta T_{p2} = 66,8^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T_{p3} = 63,2^\circ\text{C}$ ;  
 $\Delta T_{p4} = 61,5^\circ\text{C}$ .

6. Средняя температура газов в тонке:

$$T_{г1} = 0,84(2070^4 + 1453^4)^{0,25} = 1836 \text{ К}; \quad T_{г2} = 1825 \text{ К}; \quad T_{г3} = 1800 \text{ К};$$

$$T_{г4} = 1769 \text{ К}.$$

7. Расчетное время реакции в точке  $\tau_p$ :

$$\tau_{\text{проб}1} = \frac{273 \cdot 0,8}{0,194 \cdot 1836 \cdot 0,3 \cdot 1,05 \cdot 1,05} = 1,89 \text{ с}; \quad \tau_{\text{проб}2} = 1,87 \text{ с};$$

$$\tau_{\text{проб}3} = 1,83 \text{ с}; \quad \tau_{\text{проб}4} = 1,79 \text{ с};$$

$$\tau_{p1} = \frac{67,5}{2494 - 1453} \left( \frac{5,12 \cdot 52,14}{300} \right)^{0,5} \cdot 1,89 = 0,115 \text{ с};$$

$$\tau_{p2} = 0,118 \text{ с}; \quad \tau_{p3} = 0,125 \text{ с}; \quad \tau_{p4} = 0,133 \text{ с}.$$

8. Теоретическое время достижения равновесия:

$$\tau_{01} = 0,024 \exp(54\,290/2070 - 23) = 0,605 \text{ с}; \quad \tau_{02} = 0,69 \text{ с};$$

$$\tau_{03} = 0,86 \text{ с}; \quad \tau_{04} = 2,13 \text{ с}.$$

9. Концентрация избыточного кислорода в зоне горения по (5.11):

$$(C_{O_2})_{1,2} = 0,0061 \text{ кг/м}^3;$$

$$(C_{O_2})_{3,4} = 0,0058 \text{ кг/м}^3.$$

10. Концентрация термических оксидов азота

$$(\text{NO}_2^{\text{тп}})_1 = 7030 \cdot 0,0061^{0,5} \exp(-10\,860/2070) \frac{0,115}{0,605} = 0,55 \text{ г/м}^3;$$

$$(\text{NO}_2^{\text{тп}})_2 = 0,478 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^{\text{тп}})_3 = 0,382 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^{\text{тп}})_4 = 0,137 \text{ г/м}^3.$$

11. Топливные и быстрые оксиды азота. Содержание азота в топливе  $N^{\text{п}} = 0,3\%$ ;

$$(\text{NO}_2^{\text{тл}})_1 = (0,40 - 0,03) \cdot 0,3 \left( \frac{1,005 + 0,05}{1,05} \right)^2 \left( \frac{2100 - 2070}{125} \right)^{0,33} = 0,07 \text{ г/м}^3;$$

$$(\text{NO}_2^{\text{тл}})_2 = 0,08 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^{\text{тл}})_3 = 0,088 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^{\text{тл}})_4 = 0,112 \text{ г/м}^3.$$

12. Суммарный выход оксидов азота:

$$(\text{NO}_2^0)_1 = 0,55 + 0,07 = 0,62 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^0)_2 = 0,478 + 0,08 = 0,558 \text{ г/м}^3;$$

$$(\text{NO}_2^0)_3 = 0,382 + 0,088 = 0,47 \text{ г/м}^3; \quad (\text{NO}_2^0)_4 = 0,137 + 0,112 = 0,249 \text{ г/м}^3.$$

В результате: снижение выхода  $\text{NO}_2$  с увеличением рециркуляции от 5 до 15% при вводе газов через шлицы происходит в  $0,62/0,558 = 1,11$  раза, т. е. всего на 11,0%, а в случае ввода в горелки — в  $0,47/0,249 = 1,887$  раза.

**Пример 5.4.** Сравнить ожидаемый выход оксидов азота из прямоточного котла Пп-1000-25-545ГМ (ТГМП-314) и барабанного котла Е-160-9,8-560 ГМ (БКЗ-160-100 ГМ) при сжигании мазута с рециркуляцией газов 5% через шлицы под горелками. Принять исходные данные топлива, избытки воздуха на обоих котлах одинаковыми и соответствующими условиям примера 5.3. Дополнительные данные по барабанному котлу Е-160-9,8-560 ГМ (БКЗ-160-100 ГМ) ( $D = 160$  т/ч):

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Температура газов на выходе из топки ..... | 1150° С                 |
| Сечение топочной камеры .....              | 7,1 × 4,4 м;            |
|  | периметр                |
|  | $P = 23$ м              |
| Тепловое напряжение сечения .....          | 3,36 МВт/м <sup>2</sup> |
| Тепловое напряжение топочного объема ..... | 250 кВт/м <sup>3</sup>  |

**Решение.** На основании исходных данных:

|   |  |
|---|--|
| Адиабатная температура .....  | $T'_a = 2494$ К                            |
| Максимальная температура горения .....  | $T_m = 2070$ К                             |
| Температурный интервал реакции .....  | $\Delta T_p = 67,5$ С                      |
| Средняя температура газов в топке:  |  |
| прямоточного котла .....  | 1836 К                                     |
| барabanного котла .....   | 1829 К                                     |
| Расчетное время пребывания $\tau_{\text{преб}}$ :   |  |
| прямоточный котел .....   | 1,89 с                                     |
| барabanный котел .....  | 1,47 с                                     |
| Расчетное время реакции в топке $\tau_p$ :  |  |
| прямоточный котел .....   | 0,115 с                                    |
| барabanный котел $\frac{67,5}{2494 - 1423} \left( \frac{3,36 \cdot 23}{300} \right)^{0,5} 1,47 = 0,047$ с |  |
| Теоретическое время достижения равновесия .....   | $\tau_0 = 0,605$ с                         |
| Концентрация избыточного кислорода .....  | $C_{O_2} = 0,0061$ кг/м <sup>3</sup>       |
| Концентрация термических оксидов азота:   |  |
| прямоточный котел .....   | $NO_2^{\text{тп}} =$                       |
|   | $= 2,893 \frac{0,115}{0,605} =$            |
|   | $= 0,55$ г/м <sup>3</sup>                  |
| барabanный котел .....  | $NO_2^{\text{тп}} =$                       |
|   | $= 2,893 \frac{0,047}{0,605} =$            |
|   | $= 0,225$ г/м <sup>3</sup>                 |
| Концентрация топливных оксидов азота .....  | $NO_2^{\text{тл}} = 0,07$ г/м <sup>3</sup> |
| Суммарный выход оксидов азота:  |  |
| прямоточный котел .....   | $NO_2^0 = 0,62$ г/м <sup>3</sup>           |
| барabanный котел .....  | $NO_2^0 = 0,295$ г/м <sup>3</sup>          |

На котле БКЗ-160 значительно меньшей производительности, чем ТГМП-314, в равных условиях организации сжигания топлива выход  $NO_2$  снижается примерно в 2 раза, главным образом за счет сокращения времени реакции образования  $NO_2$  в силу более интенсивного охлаждения газов, так как на БКЗ-160 отношение периметра топки  $P$ , м, к сечению топочной камеры  $f_r = a_r b_r$ , в 2,14 раза больше, чем на ТГМП-314.

## ЗАДАЧИ

**Задача 5.1.** Для котла Е-160-9,8-560-ГМ (БКЗ-160-100 ГМ) при сжигании мазута определить выход оксидов азота при замене вихревых на прямоточные горелки с тангенциальным направлением горелочных струй в сечении топки. Принять избытки воздуха в топке и присосы, температуру горячего воздуха по условиям примера 5.3 и расчетные данные топки котла из примера 5.4. Расчет произвести без учета рециркуляции газов в топку, скорость воздуха на выходе из горелок 45 м/с.

**Задача 5.2.** Для котла Пп-1000-25-545-ГМ (ТГМП-314 А) в соответствии с условиями примера 5.3 определить выход  $\text{NO}_2$  при сжигании природного газа с  $Q_{\text{H}}^{\text{с}} = 36,3 \text{ МДж/м}^3$  и вводе газов рециркуляции в горячий воздух в количестве 5%. Тепловую эффективность стен зоны горения принять по мазуту. Избыток воздуха на выходе из топки принять  $\alpha_1 = 1,05$ , температура газов на выходе из топки  $\vartheta_7' = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ , остальные данные по котлу принимаются без изменений.

**Задача 5.3.** Для котла Пп-1000-25-545 К (ТПП-312 А) (пример 5.1) определить концентрацию оксидов азота при сжигании донецкого ГСШ, но с твердым шлакоудалением. Принять те же исходные данные, кроме  $\psi_{\text{з.г}} = 0,45$  и  $\vartheta_7' = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ .