

## 5.2. РАСЧЕТ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ СЕРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА И ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Оксиды серы в форме диоксида  $SO_2$  и триоксида  $SO_3$  образуются в зоне горения мазута и твердых топлив, содержащих связанную серу  $S^p$ . При сжигании природного газа образование оксидов серы может иметь место в незначительном количестве при наличии в топливе сероводорода  $H_2S$ .

### 5.2.1. Образование оксидов серы и расчет температуры точки росы при сжигании мазута

1. Объемная доля диоксида серы в продуктах сгорания

$$p_{SO_2} = V_{SO_2} / V_r = 2S^p / 100 \rho_{SO_2} V_r = 0,007S^p / V_r, \quad (5.22)$$

где  $S^p$  — содержание серы в рабочей массе топлива, %;  
 $\rho_{SO_2} = 2,86 \text{ кг/м}^3$  — удельная плотность диоксида серы;  
 $V_r = V_r^0 + (\alpha_r - 1) V_b^0$  — объем газов при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

2. Содержание избыточного (остаточного) кислорода после сгорания топлива

$$O_2 = \frac{21(\alpha_r - 1) V_b^0}{V_r}. \quad (5.23)$$

3. Процентное содержание  $SO_3$  в продуктах сгорания определяется по формуле

$$SO_3 = 100 k_p k_n p_{SO_2} O_2^{0,5}, \quad (5.24)$$

где  $k_p$  — константа равновесия при образовании  $SO_3$  в топках, принимается по значению температуры газов на выходе из топки. В области температур 1200—1500 К или 927—1227° С константа равновесия практически постоянна и составляет  $k_p = 0,053$ ;  $k_n$  — коэффициент неравновесности процесса ввиду неравномерности концентрации газовых компонент в сечении топки и кратковременности пребывания газов в топочном

объеме; значение  $k_n$  зависит от теплонапряженности сечения точки и находится по выражению

$$k_n = 0,08q_f, \quad (5.25)$$

где  $q_f = BQ_n^p / (a_1 \cdot b_1)$  — номинальное тепловое напряжение сечения точки, МВт/м<sup>2</sup>.

В итоге формула (5.24) приводится к следующему расчетному виду:

$$SO_3 = 0,424 p_{SO_2} O_2^{0,5} q_f (N/N_0)^2, \quad (5.26)$$

где  $N/N_0$  — относительная нагрузка парового котла.

Температура точки росы  $t_p$  газов в зависимости от концентрации  $SO_3$ , %, определяется по формулам

$$t_p = 50 + 11A_{SO_3}^{0,7} \quad (\text{при } SO_3 \leq 2 \cdot 10^{-3}\%); \quad (5.27)$$

$$t_p = 50 + 50A_{SO_3}^{0,2} \quad (\text{при } SO_3 > 2 \cdot 10^{-3}\%), \quad (5.28)$$

где  $A_{SO_3} = SO_3 \cdot 10^4$  — коэффициент.

Рециркуляция газов в топочную камеру не оказывает заметного влияния на уровень выхода  $SO_3$ .

Массовая концентрация диоксида  $SO_2$  в уходящих газах, г/кг топлива, составляет

$$g_{SO_2} = 10^3 (p_{SO_2} - 0,01SO_3) V_T p_{SO_2} \alpha_T / \alpha_{yx}, \quad (5.29)$$

где  $\alpha_{yx}$  — коэффициент избытка воздуха в уходящих газах.

Массовый выброс диоксида серы из котла в окружающую среду, г/с,

$$M_{SO_2} = Bg_{SO_2}, \quad (5.30)$$

где  $B$  — расход топлива в котле, кг/с.

### 5.2.2. Расчет температуры точки росы при сжигании твердых топлив

В минеральном составе твердых топлив содержатся щелочные соединения, которые в значительной мере нейтрализуют образующиеся оксиды серы  $SO_3$ , поэтому окончательное содержание  $SO_3$  в уходящих газах и температура точки росы зависят от зольности топлива  $A^p$ . Обычно в этом случае определяют сразу температуру

$$t_p = t_{\text{кон}} + 202(S^n)^{0,33} / 1,23 a_{\text{yh}} A^n, \quad (5.31)$$

где  $S^n$  и  $A^n$  — приведенные к 1 МДж теплоты значения серы и золы в рабочей массе топлива, %:

$$S^n = S^p / Q_R^p; \quad A^n = A^p / Q_R^p, \quad (5.32)$$

$t_{\text{кон}}$  — температура конденсации водяных паров, °С; определяется по парциальному давлению  $p_{H_2O} = r_{H_2O} p$ , МПа. Поскольку твердые топлива сжигаются при избытках воздуха  $\alpha_T > 1,1$ , то избыток воздуха не влияет на изменение образования  $SO_3$ .

## ПРИМЕРЫ

**Пример 5.5.** Определить концентрацию  $\text{SO}_3$ , температуру точки росы и массовый выброс  $\text{SO}_2$  при сжигании мазута в котле Пп-2650-25-545 ГМ (ТГМП-204) ( $N_0 = 800$  МВт) и относительных нагрузках 1; 0,8; 0,7 и 0,5  $N_0$ . В топке котла сжигается высокосернистый мазут с  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 38,77$  МДж/кг при сернистости топлива  $S^{\text{P}} = 2,6\%$  и избытке воздуха  $\alpha_{\text{T}} = 1,02$ . Тепловое напряжение сечения топки  $g_{\text{f}} = 8,92$  МДж/м<sup>2</sup>.

**Решение.** Для данного топлива  $V_{\text{B}}^0 = 10,2$  и  $V_{\text{r}}^0 = 10,99$  м<sup>3</sup>/кг;

$$V_{\text{r}} = 10,99 + (1,02 - 1) 10,2 = 11,194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объемная доля диоксида серы по (5.22)

$$p_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot 2,6 / 11,194 = 1,626 \cdot 10^{-3}.$$

Содержание избыточного кислорода в топке по (5.23)

$$\text{O}_2 = 21 \cdot 0,02 \cdot 10,2 / 11,194 = 0,383\%.$$

Содержание  $\text{SO}_3$  при номинальной нагрузке [по (5.26)]

$$\text{SO}_3 = 0,424 \cdot 1,626 \cdot 10^{-3} \cdot 0,383^{0,5} \cdot 8,92 \cdot 1 = 3,8 \cdot 10^{-3}\%.$$

То же при пониженных нагрузках котла:

при 0,8  $N_0$

$$\text{SO}_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8^2 = 2,435 \cdot 10^{-3}\%;$$

при 0,7  $N_0$

$$\text{SO}_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7^2 = 1,865 \cdot 10^{-3}\%;$$

при 0,5  $N_0$

$$\text{SO}_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5^2 = 0,951 \cdot 10^{-3}\%.$$

Значения температуры точки росы:

при номинальной нагрузке по (5.28)

$$t_{\text{p}} = 50 + 50 \cdot 38^{0,2} = 153,5^\circ \text{C};$$

при нагрузке 0,8  $N_0$  по (5.28)

$$t_{\text{p}} = 50 + 50 \cdot 24,35^{0,2} = 144,7^\circ \text{C};$$

при нагрузке 0,7  $N_0$  по (5.27)

$$t_{\text{p}} = 50 + 11 \cdot 18,65^{0,7} = 135,3^\circ \text{C};$$

при нагрузке 0,5  $N_0$  по (5.27)

$$t_{\text{p}} = 50 + 11 \cdot 9,51^{0,7} = 103,2^\circ \text{C}.$$

Массовая концентрация  $\text{SO}_2$  в уходящих газах при номинальной

нагрузке  $g_{\text{SO}_2} = 10^3 (1,626 \cdot 10^{-3} - 3,8 \cdot 10^{-5}) 11,194 \cdot 2,86 \frac{1,02}{1,22} = 42,5$  г/кг. Массовый выброс  $\text{SO}_2$  в окружающую среду по (5.30)

$$M_{\text{SO}_2} = 57,7 \cdot 42,5 = 2452,5 \text{ г/с}.$$

Здесь  $B = 57,7$  кг/с — расход мазута при номинальной нагрузке.

**Пример 5.6.** Сравнить значения  $SO_3$  и температуру точки росы при сжигании мазута в котле Пп-2650-25-545 ГМ (ТГМП-204) (см. пример 5.5) при номинальной нагрузке с аналогичными условиями сжигания этого вида мазута в котлах Пп-950-25-565 ГМ (ПК-41) ( $q_f = 6,2 \text{ МВт/м}^2$ ), Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-314) ( $q_f = 4,85 \text{ МВт/м}^2$ ) и Е-420-13,8-560 ГМ (ТГМ-84) ( $q_f = 3,6 \text{ МВт/м}^2$ ).

**Решение.** В примере 5.5 для котла (ТГМП-204) получены значения:

$$SO_3 = 3,8 \cdot 10^{-3}\% \text{ и } t_p = 153,5^\circ \text{ С.}$$

Содержание  $SO_3$  в других котлах [по (5.26)] при одинаковых значениях  $p_{SO_2}$  и  $O_2$ , но разных значениях  $q_f$  составляет:

для ПК-41

$$SO_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \frac{6,2}{8,92} = 2,64 \cdot 10^{-3}\%;$$

для ТГМП-314

$$SO_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \frac{4,85}{8,92} = 2,07 \cdot 10^{-3}\%;$$

для ТГМ-84

$$SO_3 = 3,8 \cdot 10^{-3} \frac{3,6}{8,92} = 1,53 \cdot 10^{-3}\%.$$

Значения температуры точки росы по (5.27) и (5.28):

для ПК-41

$$t_p = 50 + 50 \cdot 26,4^{0,2} = 146,2^\circ \text{ С;}$$

для ТГМП-314

$$t_p = 50 + 50 \cdot 20,7^{0,2} = 141,6^\circ \text{ С;}$$

для ТГМ-84

$$t_p = 50 + 11 \cdot 15,3^{0,7} = 125,6^\circ \text{ С.}$$

Уменьшение тепловых напряжений в топке снижает уровень образования  $SO_3$ .

**Пример 5.7.** В котле Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-314) сжигается сернистый мазут с  $Q_w^p = 39,73 \text{ МДж/кг}$  при сернистости топлива  $S^p = 1,4\%$  и избытке воздуха в топке  $\alpha_t = 1,02$  и  $1,05$ . Определить содержание  $SO_3$  в дымовых газах, температуру точки росы и сравнить с результатами расчета в примере 5.6.

**Решение.** Для данного топлива  $V_w^0 = 10,45$  и  $V_r^0 = 11,27 \text{ м}^3/\text{кг}$ . При избытке воздуха  $\alpha_t = 1,02$

$$V_r = 11,27 + 0,02 \cdot 10,45 = 11,479 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\text{объемная доля } p_{SO_2} = 0,007 \cdot 1,4/11,479 = 0,854 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{содержание избыточного кислорода } O_2 = \frac{21 \cdot 0,02 \cdot 10,45}{11,479} = 0,382\%;$$

содержание оксида серы в газах

$$SO_3 = 0,424 \cdot 0,854 \cdot 10^{-3} (0,382)^{0,5} 4,85 \cdot 1 = 1,086 \cdot 10^{-3} \%$$

температура точки росы  $t_p = 50 + 11 \cdot 10,86^{0,7} = 108,4^\circ \text{C}$ .

Уменьшение содержания серы в мазуте с 2,6 до 1,4% привело к снижению образования  $SO_3$  в  $\frac{2,07}{1,086} = 1,9$  раза, а  $t_p$  снизилось

на  $141,6 - 108,4 = 33,2^\circ \text{C}$ .

При избытке воздуха  $\alpha_r = 1,05$

$$V_r = 11,27 + 0,05 \cdot 10,45 = 11,792 \text{ м}^3/\text{кг};$$

объемная доля  $p_{SO_2} = 0,831 \cdot 10^{-3}$ ;

содержание избыточного кислорода

$$O_2 = \frac{21 \cdot 0,05 \cdot 10,45}{11,792} = 0,93 \%$$

содержание оксида серы  $SO_3 = 0,424 \cdot 0,831 \cdot 10^{-3} \times (0,93)^{0,6} 4,85 \cdot 1 = 1,648 \cdot 10^{-3} \%$ ;

температура точки росы  $t_p = 50 + 11 \cdot 16,48^{0,7} = 128,2^\circ \text{C}$ . Увеличение избытка воздуха привело к увеличению содержания  $SO_3$  в  $1,648/1,086 = 1,52$  раза и росту температуры точки росы на  $128,2 - 108,4 = 19,8^\circ \text{C}$ .

**Пример 5.8.** Определить температуру точки росы при сжигании в паровом котле донецкого газового топлива (отсевы), имеющего  $Q_n^p = 18,88$  МДж/кг;  $S^p = 3,5\%$ ;  $A^p = 28,5\%$ . Долю уноса золы с газами принять  $a_{yn} = 0,95$ .

**Решение.** Приведенные значения сернистости и зольности топлива по (5.32)  $S^n = 3,5/18,88 = 0,185\%$ ;  $A^n = 28,5/18,88 = 1,51\%$ . Температура точки росы при парциальном давлении водяных паров  $p_{H_2O} = 0,009$  МПа  $t_p = 43 + 202 (0,185)^{0,33} / 1,23^{0,95 \cdot 1,51} = 128,7^\circ \text{C}$ .

По сравнению с сжиганием мазута в котле Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-314) (пример 5.6) значение  $t_p$  для твердого топлива оказалось ниже, чем на мазуте ( $t_p = 141,6^\circ \text{C}$ ), хотя твердое топливо имеет большую сернистость.

## ЗАДАЧИ

**Задача 5.4.** Определить значения  $SO_3$  и  $t_p$  при сжигании высокосернистого мазута с  $S^p = 2,9\%$  в газоплотном котле Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-324) ( $q_f = 6,8$  МВт/м<sup>2</sup>) при  $\alpha_r = 1,010$  и сравнить со значениями  $SO_3$  и  $t_p$  при сжигании того же топлива в котле Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-114) ( $q_f = 5,58$  МВт/м<sup>2</sup>) при  $\alpha_r = 1,05$ . Исходные значения теоретических объемов газов и воздуха взять из примера 5.5.

**Задача 5.5.** Определить значение  $t_p$  при сжигании в топке котла с твердым шлакоудалением ( $a_{yn} = 0,95$ ) кузнецкого каменного угля марки Д ( $Q_n^p = 22,86$  МДж/кг;  $S^p = 0,4\%$ ;  $A^p = 13,2\%$ ) и кизеловского угля марки Г ( $Q_n^p = 18,38$  МДж/кг;  $S^p = 5,3\%$ ;  $A^p = 34,8\%$ ) и сравнить результаты.

**Задача 5.6.** Определить значение  $t_p$  при сжигании кизеловского угля марки Г (задача 5.5) в топке с жидким шлакоудалением при  $a_{yH} = 0,7$ .

**Задача 5.7.** Найти значения  $\rho_{SO_3}$  и  $t_p$  при сжигании сернистого мазута ( $Q_H^p = 39,73$  МДж/кг,  $S^p = 1,4\%$ ) в топке пикового водогрейного котла КВ-ГМ-180 ( $Q_k = 209$  МВт), имеющего сечение топочной камеры  $f_T = 6,48 \times 5,74$  м, при избытке воздуха  $\alpha_T = 1,04$  (теоретические объемы газов и воздуха взять из примера 5.7).