

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор-директор ЭНИН

\_\_\_\_\_ Ю.С. Боровиков

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **РАСЧЕТ ВАЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ТЭС**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Методы защиты окружающей среды»,  
для студентов IV курса, обучающихся по направлению  
141100 «Энергетическое машиностроение»

*Составители* **Н.В. Визгавлюст, Р.Н. Кулеш, К.В. Буваков**

УДК 621.311.22.002.5:621.1.004(076)

ББК 31.37-5я73

P24

**P 24**      **Расчет валовых выбросов вредных веществ ТЭС:** Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Методы защиты окружающей среды», для студентов IV курса, обучающихся по направлению 141100 «Энергетическое машиностроение» / сост. Н.В. Визгавлюст, Р.Н. Кулеш, К.В. Буваков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 20 с.

УДК 621.311.22.002.5:621.1.004(076)

ББК 31.37-5я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
парогенераторостроения и парогенераторных установок ЭНИИ  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012г.

Зав. кафедрой ПГС и ПГУ

доктор техн. наук,

профессор

\_\_\_\_\_ *А.С. Заворин*

Председатель

учебно-методической комиссии

\_\_\_\_\_ *Н.М. Космынина*

*Рецензент*

Кандидат технических наук  
доцент кафедры АТЭС ЭНИИ

*В.И. Беспалов*

© Составление. ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

© Визгавлюст Н.В., Кулеш Р.Н., Буваков К.В., составление, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Расчет выбросов твердых частиц .....	6
2 Расчет оксидов серы и температуры точки росы при сжигании мазута и твердых топлив.....	6
3 Расчет выбросов оксидов азота .....	9
4 Расчет выбросов оксида углерода .....	11
5 Расчет выбросов оксидов ванадия.....	11
6 Теоретические положения расчета образования оксидов азота .....	12
7 Перерасчет концентраций загрязнений веществ для коэффициентов избытка воздуха отличных от $\alpha = 1,4$ .....	15
Список литературы .....	16
Приложения.....	17

## Введение

Защита атмосферного воздуха от загрязнений является одной из наиболее острых проблем современности. Несмотря на то, что на долю природных источников загрязнения воздуха приходится около 50 % соединений серы, поступающих в атмосферный воздух, 93 % оксиды азота, значительная доля оксидов углерода и немало других загрязнений, все же наибольшую опасность создают искусственные источники загрязнения, связанные с деятельностью человека, в первую очередь процессы сжигания топлива.

В отличие от природных искусственные источники загрязнения отличаются крайней неравномерностью распределения. К основным загрязнителям воздуха следует отнести оксиды углерода, сернистый ангидрид, оксиды азота, озон, аммиак, сероводород, сероуглерод, твердые частицы и т. п.

Основными промышленными источниками выбросов в атмосферу твердых частиц являются электростанции, промышленные и отопительные котельные, и т. п. Выброс золы при сжигании твердых топлив зависит от состава их минеральной части, типа топочного устройства (слоевые, камерные топки с твердым или жидким шлакоудалением) и эффективности работы пылеулавливающих установок.

Одной из наиболее значимых групп токсичных веществ попадающих в атмосферный воздух, являются продукты неполного сгорания топлива: окись углерода (СО), альдегиды (НСНО), органические кислоты.

В конечных продуктах сгорания концентрация оксидов углерода зависит от аэродинамики топочной камеры и организации сжигания топлива: эффективности перемешивания холодного топливовоздушного потока с рециркулирующими продуктами сгорания, расположения поверхностей нагрева по отношению к факелу, взаимного расположения горелок и другие факторы [1].

К числу обладающих большой канцерогенной активностью и достаточно хорошо изученных канцерогенных веществ следует отнести бенз(а)пирен. Образование бенз(а)пирена протекает с участием углеводородов ряда ацетилена. Значительное количество бенз(а)пирена выделяется при режимах горения, сопровождающихся сажеобразованием, и зависит прежде всего от избытка воздуха в топке и температуры факела. В хорошо отрегулированных топочных устройствах выход бенз(а)пирена не превышает  $0,4 \cdot 10^{-4}$  мг/м<sup>3</sup> продуктов сгорания. Бенз(а)пирен хорошо растворяется в ацетоне, толуоле и ряде других растворителей и может быть уловлен фильтрами из ткани ФПП-15 [16].

При сжигании органического топлива в атмосферу выбрасывается более 90 % антропогенных диоксидов серы, в том числе порядка 60 % – на ТЭС. Это связано с достаточно высоким уровнем использования серосодержащего топлива (в первую очередь – высокосернистых мазутов и углей).

В твердом топливе сера встречается в трех разновидностях:

- Органическая сера  $S_{\text{орг}}$ , связанная с основными элементами органической массы топлива (С, Н, О) в виде сложных органических соединений;

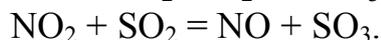
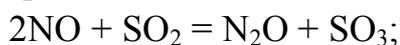
- Колчеданная сера  $S_k$  связанная с железом в серый колчедан (пирит) и вкрапленная в топливо в виде отдельных тяжелых кусков;

- Сульфатная сера  $S_c$ , в виде солей серной кислоты ( $FeSO_4$  и пр.).

Органическая и колчеданная разновидности серы сгорают, образуя главным образом сернистый газ  $SO_2$ , а так же частично  $SO_3$  (в зависимости от состава топлива и условий сжигания). Эта часть серы входит в состав горючей части топлива и ее содержание может достигать 6–8 %. В нефти сера входит в состав органических соединений. Сульфатная сера не горит, и она полностью относится к негорючей части топлива (золе).

Для теплоэнергетики наибольшее значение имеют диоксид серы ( $SO_2$ ) и оксиды азота ( $NO_x$ ), так как сернистый ангидрид и монооксид азота практически всегда одновременно присутствуют в продуктах сгорания и обладают суммированным действием.

Диоксид серы или сернистый газ занимает второе место (после оксида углерода) по массе загрязняющего атмосферу вещества. Основная причина наличия диоксида серы в атмосфере – использование ископаемого топлива, в первую очередь, угля. В топочных устройствах диоксид серы образуется при сгорании серы, содержащейся в топливе. Поэтому в технологии топливосжигания основным направлением предотвращения выбросов  $SO_2$  является использование низкосернистых топлив. Количество серного ангидрида зависит не только от температуры и содержания кислорода, но и от концентрации оксидов азота в продуктах сгорания:



В отличие от молекулярного азота  $N_2$ , который составляет 79 % атмосферного воздуха, оксиды азота содержатся в атмосфере в значительно меньших количествах, но, несмотря на это, их роль в жизни человека весьма существенна.

Оксиды азота обычно классифицируются в зависимости от степени окисления азота. При соединении азота с кислородом по мере увеличения его валентности образуется гемеоксид  $N_2O$ , оксид  $NO$ , азотистый ангидрид  $N_2O_3$ , диоксид  $NO_2$ , тетраоксид  $N_2O_4$  и азотный ангидрид  $N_2O_5$ . В проблеме охраны окружающей среды практическое значение имеют оксид и диоксид азота, сумму которых часто обозначают как  $NO_x$ . Другие оксиды азота не считаются важными с биологической точки зрения или их присутствие в земной атмосфере ничтожно мало вследствие неустойчивости этих соединений.

### **Цель лабораторной работы:**

- Определить валовые выбросы вредных веществ парового котла;
- Сравнить полученные значения массовых выбросов оксида азота, серы и летучей золы с нормативами удельных выбросов в атмосферу;
- По итогам расчетов выбрать наиболее перспективные воздухоохраные технологии;
- Провести расчет оксидов азота аналитическим методом с использованием ЭВМ.

## 1 Расчет выбросов твердых частиц

При расчете выбросов твердых частиц в атмосферу необходимо учитывать, что вместе с золой в атмосферу поступает несгоревшее топливо (недожог).

1.1 Общее количество золы, уносимое с дымовыми газами, на 1 кг сожженного топлива с учетом недожога

$$g = a_{\text{ун}} \frac{A^{\text{p}}}{100} \left( 1 + \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right), \text{ кг/кг,}$$

где  $A^{\text{p}}$  – зольность топлива на рабочую массу, %;  $a_{\text{ун}}$  – доля твердых частиц, уносимых из топки с дымовыми газами;  $\Gamma_{\text{ун}}$  – содержание горючих в золе уноса, %.

1.2 Механический недожог  $q_4$  для камерных топок, если принять одинаковым содержание горючих в шлаке и уносе, можно определить по выражению

$$\frac{q_4}{100} = \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} = \frac{32,7}{Q_{\text{н}}^{\text{p}}} \cdot \frac{A^{\text{p}}}{100},$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг; 32,7 – средняя теплота сгорания горючих в уносе, МДж/кг.

Поставив отношение  $\frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}}$  в формулу п.п. 1.1, получим количество золы

в уносе на 1 кг топлива с учетом недожога

$$g = \frac{a_{\text{ун}}}{100} \left( A^{\text{p}} + q_4 \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{32,7} \right).$$

1.3 Выброс золы в атмосферу в единицу времени с учетом улавливания ее в золоуловителях

$$M_3 = B \frac{A^{\text{p}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} a_{\text{ун}} (1 - \eta_3), \text{ г/с (т/год),}$$

где  $B$  – расход натурального топлива за рассматриваемый период, (г/с, т/год);  $\eta_3$  – степень улавливания твердых частиц в золоуловителе;  $a_{\text{ун}}$  – доля твердых частиц, уносимых из топки с дымовыми газами, зависит от типа котла.

1.4 Количество выбрасываемой золы, при отсутствии эксплуатационных данных по содержанию горючих в уносе

$$M_3 = B \cdot A^{\text{p}} \cdot a_{\text{ун}} (1 - \eta_3), \text{ г/с (т/год).}$$

## 2 Расчет оксидов серы и температуры точки росы при сжигании мазута и твердых топлив

Оксиды серы в форме диоксида  $\text{SO}_2$  и триоксида  $\text{SO}_3$  образуются в зоне горения мазута и твердых топлив, содержащих связанную серу  $\text{S}^{\text{p}}$ . При сжигании природного газа образование оксидов серы может иметь место в незначительном количестве при наличии в топливе сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$ .

## 2.1 Расчет выбросов оксидов серы и температуры точки росы при сжигании мазута

### 2.1.1 Объемная доля диоксида серы в продуктах сгорания

$$p_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_r} = \frac{2 \cdot S^p}{100 \cdot \rho_{\text{SO}_2} \cdot V_r} = \frac{0,007 \cdot S^p}{V_r},$$

где  $S^p$  – содержание серы в рабочей массе топлива, %;  $p_{\text{SO}_2}$  – удельная плотность диоксида серы;  $V_r = V_r^0 + (\alpha_r - 1) \cdot V_b^0$  – объем газов при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кг.

### 2.1.2 Содержание избыточного (остаточного) кислорода после сгорания топлива

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

### 2.1.3 Процентное содержание SO<sub>3</sub> в продуктах сгорания

$$SO_3 = 100 \cdot k_p \cdot k_n \cdot p_{\text{SO}_2} \cdot O_2^{0,5},$$

где  $k_p$  – константа равновесия при образовании SO<sub>3</sub> 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 неравномерности процесса в виду неравномерности концентрации газовых компонентов в сечении топки и кратковременности пребывания газов в топочном объеме, значение  $k_n$  зависит от теплонапряженности сечения топки.

#### 2.1.3.1 Номинальное тепловое напряжение сечения топки

$$q_f = \frac{B \cdot Q_n^p}{a_t \cdot b_t}, \text{ МВт/м}^2,$$

где  $a_t$  – ширина топочной камеры,  $b_t$  – глубина топочной камеры.

#### 2.1.3.2 Коэффициент неравномерности процесса $k_n = 0,08 \cdot q_f$ .

#### 2.1.3.3 Содержание SO<sub>3</sub> в продуктах сгорания

$$SO_3 = 0,424 \cdot p_{\text{SO}_2} \cdot O_2^{0,5} \cdot q_f \frac{N}{N_0},$$

где  $\frac{N}{N_0}$  – относительная нагрузка парового котла.

### 2.1.4 Массовая концентрация диоксида SO<sub>2</sub> в уходящих газах

$$q_{\text{SO}_2} = 10^3 \cdot (p_{\text{SO}_2} - 0,01 \cdot SO_3) \cdot V_r \cdot \rho_{\text{SO}_2} \frac{\alpha_r}{\alpha_{yx}},$$

где  $\alpha_{yx}$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;  $\alpha_r$  – коэффициент избытка воздуха в топке.

### 2.1.5 Массовый выброс диоксида серы из котла в окружающую среду

$$M_{\text{SO}_2} = q_{\text{SO}_2} \cdot B, \text{ г/с},$$

где  $B$  – расход натурального топлива, кг/с.

### 2.1.6 Температура точки росы

Температура точки росы газов определяется в зависимости от концентрации  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$

$$t_p = 50 + 11 \cdot A_{\text{SO}_3}^{0.7}, \text{ при } \text{SO}_3 \leq 2 \cdot 10^{-3} \%,$$

$$t_p = 50 + 50 \cdot A_{\text{SO}_3}^{0.2}, \text{ при } \text{SO}_3 > 2 \cdot 10^{-3} \%,$$

где  $A_{\text{SO}_3} = \text{SO}_3 \cdot 10^4$  – коэффициент.

## 2.2 Расчет выбросов оксидов серы и температуры точки росы при сжигании топлива

### 2.2.1 Температура точки росы

$$t_p = \frac{t_{\text{кон}} + 202(S^n)^{0.33}}{1,23^{a_{\text{зн}} A^n}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $S^n$  и  $A^n$  – приведенные к 1 МДж теплоты значения серы и золы в рабочей массе топлива, %:  $S^n = \frac{S^p}{Q_H^p}$ ,  $A^n = \frac{A^p}{Q_H^p}$ ;  $t_{\text{кон}}$  – температура конденсации водяных паров,  $^\circ\text{C}$ , определяется по парциальному давлению  $p_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p$ , МПа.

### 2.2.2 Расчет выбросов оксида серы

2.2.2.1 Доля оксидов серы, связываемых летучей золой в газоходах котла  $\eta_{\text{SO}_2}^1$  (см. прил. 1, табл. 1.1).

2.2.2.2 Доля оксидов серы, улавливаемая в золоуловителях попутно с улавливанием твердых частиц  $\eta_{\text{SO}_2}^2$

Примечание: Доля серы  $\eta_{\text{SO}_2}^2$  улавливаемой с сухих золоуловителей (электрофильтрах, батарейных циклонах), принимается равной нулю. В мокрых золоуловителях типа МВ и МС эта доля зависит от общей щелочности и от приведенной сернистости топлива при принятых на тепловых электростанциях удельных расходах воды на орошение золоуловителей  $0,1-0,15 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ , (см. прил. 1, рис. 1).

2.2.2.3 Доля оксидов серы, улавливаемая в сероочистительной установке

$$\eta_{\text{SO}_2}^c.$$

2.2.2.4 Длительность работы сероочистной установки и котла

$$n_{\text{cy}}, n_{\text{к}}, \text{ ч/год}.$$

2.2.2.5 Количество оксидов серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  в пересчете на  $\text{SO}_2$  ( $M_{\text{SO}_2}$ )

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02B \cdot S^p \cdot (1 - \eta_{\text{SO}_2}^1) \cdot (1 - \eta_{\text{SO}_2}^2) \cdot \left(1 - \eta_{\text{SO}_2}^c \frac{n_{\text{cy}}}{n_{\text{к}}}\right), \text{ г/с (т/год)}.$$

### 3 Расчет выбросов оксидов азота

Расчет основан на эмпирических формулах, которые дают приближенное значение выбросов оксидов азота с погрешностью  $\pm 15\text{--}20\%$ . Метод применим для энергетических котлов паропроизводительностью более 30 т/ч и водогрейных котлов с теплопроизводительностью более 125 ГДж/ч.

3.1 Коэффициент, характеризующий выход оксидов азота

3.1.1 Для котлов паропроизводительностью  $D = 220$  т/ч и более при сжигании газа и мазута во всем диапазоне нагрузок

$$K = \frac{12 \cdot D_{\phi}}{200 + D_{н}}$$

где  $D_{н}$  и  $D_{\phi}$  – номинальная и фактическая паропроизводительность котла, т/ч.

3.1.2 Для котлов производительностью от 30 до 200 т/ч

$$K = \frac{7,5 \cdot D_{\phi}}{50 + D_{н}}$$

3.1.3 Для водогрейных котлов

$$K = \frac{2,5 \cdot Q_{\phi}}{84 + Q_{н}}$$

где  $Q_{н}$  и  $Q_{\phi}$  – номинальная и фактическая тепловая мощность котла, ГДж/ч<sup>2</sup>.

3.2 Потеря тепла от механического недожога  $q_4$ , %.

3.3 Коэффициент, учитывающий влияние на выход оксидов азота качества сжигаемого топлива  $\beta_1$ .

3.3.1 Значения при сжигании твердого топлива

$$\text{при } \alpha_{\tau} \leq 1,25, \beta_1 = 0,178 + 0,74N^{\Gamma};$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,25, \beta_1 = (0,178 + 0,74N^{\Gamma}) \cdot \frac{\alpha_{\tau}}{1,25},$$

где  $N^{\Gamma}$  – содержание азота в топливе на горючую массу, %.

3.3.2 Значения при сжигании жидкого и газообразного топлива для газа

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,05, \beta_1 = 0,9;$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,03\text{--}1,05, \beta_1 = 0,8;$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,03, \beta_1 = 0,7 \text{ для мазута};$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,05, \beta_1 = 1;$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,03\text{--}1,05, \beta_1 = 0,9;$$

$$\text{при } \alpha_{\tau} > 1,03, \beta_1 = 0,75.$$

3.4 Коэффициент, учитывающий конструкцию горелок  $\beta_2$

для вихревых горелок  $\beta_2 = 1$ ;

для прямоточных горелок  $\beta_2 = 0,85$ .

3.5 Коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления  $\beta_3$

при твердом шлакоудалении  $\beta_3 = 1$ ;

при жидком шлакоудалении  $\beta_3 = 1,6$ .

3.6 Коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов в зависимости от условий подачи их в топку  $\varepsilon_1$

Значения коэффициента  $\varepsilon_1$  при номинальной нагрузке и  $r \leq 30\%$  принимаются в зависимости от топлива и способа его подачи.

3.6.1 При сжигании газа и мазута и вводе рециркуляции

в под топки  $\varepsilon_1 = 0,0025$ ;

через шлицы перед горелками  $\varepsilon_1 = 0,015$ ;

по наружному каналу горелок  $\varepsilon_1 = 0,025$ ;

в воздушное дутье  $\varepsilon_1 = 0,035$ .

3.6.2 При высокотемпературном сжигании твердого топлива вводе газов рециркуляции

в первичную аэросмесь  $\varepsilon_1 = 0,01$ ;

во вторичный воздух  $\varepsilon_1 = 0,005$ ;

при низкотемпературном сжигании твердого топлива  $\varepsilon_1 = 1$ .

3.7 Доля оксидов азота, улавливаемых в азотоочистной установке  $\eta_{аз}$ .

3.8 Длительность работы азотоочистной установки и котла

$$n_{ay}, n_k, \text{ ч/год.}$$

3.9 Суммарное количество оксидов азота  $NO_x$  в перерасчете на полное окисление оксидов азота в диоксид азота  $NO_2$ , выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами котла при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива

$$M_{NO_x} = 10^{-3} B \cdot K \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \cdot \beta_1 (1 - \varepsilon_1 r) \beta_2 \cdot \beta_3 \left( 1 - \eta_{аз} \frac{n_{ay}}{n_k} \right), \text{ т/год (мг/с)}.$$

3.10 Расчет загрязнения атмосферного воздуха величины выбросов диоксида и оксида азота в суммарном содержании  $NO_x$  в выбрасываемых в атмосферу дымовых газах

$$M_{NO_2} = 0,8 \cdot M_{NO_x},$$

$$M_{NO} = (1 - 0,8) \cdot M_{NO_x} \frac{\mu_{NO}}{\mu_{NO_2}} = 0,13 \cdot M_{NO_x},$$

где  $\mu_{NO}$  и  $\mu_{NO_2}$  – молекулярные веса  $NO$  и  $NO_2$ ; 0,8 – принятый коэффициент трансформации оксида азота в диоксид.

## 4 Расчет выбросов оксида углерода

4.1 Количество выбросов оксида углерода, выбрасываемое в атмосферу с дымовыми газами каждого котла при сжигании твердого, жидкого газообразного топлива

$$M_{CO} = 0,001 \cdot C_{CO} \cdot B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right),$$

где  $C_{CO}$  – выход оксида углерода при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива при эксплуатационном режиме котла, кг/т (кг/тыс. м<sup>3</sup>);  $B$  – расход топлива за рассматриваемый период, т/год (г/с, тыс. м<sup>3</sup>/год);  $q_4$  – потери тепла с механическим недожогом.

4.2 Количество оксида углерода

$$C_{CO} = 0,01 \cdot q_4 \frac{R \cdot Q_H^p \cdot \gamma_{CO}}{Q_{CO} \cdot 10^{-3}} = \frac{q_3 \cdot R \cdot Q_H^p}{1013}, \text{ т/год (тыс. м}^3\text{/год)},$$

где  $q_3$  – потери тепла с химическим недожогом, %;  $R$  – коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленной неполным сгоранием оксида углерода;  $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $\gamma_{CO}$  – удельный вес оксида углерода  $\gamma_{CO} = 1,25 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях;  $Q_{CO}$  – теплота сгорания оксида углерода  $Q_{CO} = 12650 \text{ кДж/м}^3$ .

4.3 Коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива

для твердого топлива  $R = 1$ ;  
для мазута  $R = 0,65$ ;  
для газа  $R = 0,5$ .

## 5 Расчет выбросов оксидов ванадия

5.1 Соединения ванадия являются составной частью мазутной золы. Количество оксидов ванадия в перерасчете на пентаоксид ванадия, выбрасываемого в атмосферу с дымовыми газами каждого котла при сжигании жидкого топлива

$$M_{V_2O_5} = 10^{-6} G_{V_2O_5} B (1 - \eta_a) (1 - \eta_{уп}), \text{ т/год (г/с)},$$

где  $G_{V_2O_5}$  – содержание ванадия в жидком топливе при пересчете на  $V_2O_5$ , г/т;  $\eta_a$  – коэффициент оседания оксидов ванадия на поверхности нагрева котлов;  $\eta_{уп}$  – доля твердых частиц продуктов сгорания жидкого топлива, улавливаемых в устройствах для очистки газов мазутных котлов.

5.2 При отсутствии результатов анализа топлива  $G_{V_2O_5}$  в сжигаемом топливе

$$G_{V_2O_5} = 4000 \cdot A^p,$$

где  $A^p$  – содержание серы в мазуте на рабочую массу.

5.3 Коэффициент оседания оксидов ванадия на поверхности нагрева котлов

5.3.1 Для котлов с промежуточными пароперегревателями очистки поверхностей нагрева которых производится в остановленном состоянии  $\eta_a = 0,07$ .

5.3.2 Для котлов без промежуточных пароперегревателей при тех же условиях очистки  $\eta_a = 0,05$ .

5.3.3 Для остальных случаев  $\eta_a = 0$ .

## 6 Теоретические положения расчета образования оксидов азота

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;
- 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 поступающим в горелки воздуха в начальной зоне горения факела при температурах выше 1000 К.

6.1 Образование термических оксидов азота

6.1.1 Тепловыделение в зоне горения

$$Q_T = Q_H^p + Q_{ГВ} + i_{ТЛ}, \text{ кДж/кг.}$$

6.1.2 Температурный коэффициент изменения теплоемкости

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000}.$$

6.1.3 Ожидаемая адиабатическая температура

$$\text{для твердого топлива } t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} (1 + 10^{-5} Q_T), \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{для мазута и природного газа } t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} (1 + 0,36 \cdot 10^{-5} Q_T), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Примечание: Допустимое расхождение между предварительно принятой  $t_a$  и полученным значением  $(T'_a + 273)$  не должно превышать 50 °С, иначе необходимо принимать навое  $t_a = T'_a - 273$  °С и уточнить  $c_r$  и  $c_b$ .

6.1.4 Средняя теплоемкость продуктов сгорания

$$\text{при сжигании твердого топлива } c_r = (1,59 + 0,004 \cdot W^n) + 0,14 \cdot k_t;$$

$$\text{при сжигании мазута } c_r = 1,58 + 0,122 \cdot k_t;$$

$$\text{при сжигании природного газа } c_r = 1,57 + 0,134 \cdot k_t.$$

6.1.5 Теплоемкость воздуха  $c_b = 1,46 + 0,092 \cdot k_t$ .

6.1.6 Избыток воздуха в зоне горения

при наличии присосов в топку  $\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T$ ;

для газоплотных котлов  $\alpha_{гор} = \alpha_T$ .

6.1.7 Условная адиабатическая температура в зоне горения

$$T'_a = \frac{Q_T}{V_r^0 \cdot c_r + 1,016(\alpha_{гор} - 1) \cdot V_b^0 \cdot c_b}.$$

6.1.8 Доля сгоревшего топлива на участке от выходе из горелки до завершения интенсивного высокотемпературного горения

для твердых топлив  $\beta = 0,95-0,97$ ;

для природного газа и мазута  $\beta = 0,97-0,99$ .

6.1.9 Коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра горения  $\psi_{зг}$ .

6.1.10 Доля рециркулирующих газов в зону горения  $r$ .

6.1.11 Коэффициент, учитывающий способ ввода рециркулирующих газов в топку

при вводе через сопла под горелками  $n = 6,5$ ;

при вводе через кольцевой канал вокруг горелки  $n = 5,0$ ;

при смешивании газов с горячим воздухом  $n = 3,0$ .

6.1.12 Коэффициент, учитывающий тип горелки

для вихревых настенных горелок  $m_r = 1$ ;

для подовых горелок  $m_r = 0,985$ ;

для прямоточных настенных горелок  $m_r = 0,95 \left( \frac{25}{\omega_b} \right)^{0,2}$ ,

где  $\omega_b$  – скорость воздуха на выходе из горелки.

6.1.13 Максимальная температура зоны горения

$$T_m = \beta_{сг} \cdot T'_a (1 - \psi_{зг})^{0,25} (1 - r^{1+nr}) \cdot m_r, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6.1.14 Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксида азота при температуре  $T_m$

$$\tau_0 = 0,024 \exp\left(\frac{54290}{T_m - 23}\right), \text{ с}.$$

6.1.15 Температурный интервал активной реакции

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_m \cdot 10^{-5}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6.1.16 Расчетный периметр стен призматической топки

$$П = 2 \cdot a_T + 2 \cdot b_T, \text{ м}.$$

6.1.17 Среднее тепловое напряжение сечения топочной камеры

$$q_f = \frac{B \cdot Q_H^p}{a_T \cdot b_T}, \text{ МВт/м}^2.$$

6.1.18 Тепловое напряжение топочного объема

$$q_V = \frac{B \cdot Q_H^p}{V_T}, \text{ МВт/м}^2.$$

6.1.19 Удельный приведенный объем газов

для антрацита и полуантрацита  $v_r^п = 0,273, \text{ м}^3/\text{МДж}$ ;

для остальных твердых топлив  $v_r^п = 0,278 + 0,001 \cdot W^п, \text{ м}^3/\text{МДж}$ ;

для мазута  $v_r^п = 0,281, \text{ м}^3/\text{МДж}$ ;

для природного газа  $v_r^п = 0,3, \text{ м}^3/\text{МДж}$ .

6.1.20 Коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газов

при встречных вихревых горелках  $\xi = 0,8$ ;

то же для однофронтального расположения  $\xi = 0,75$ ;

для тангенциального расположения горелок  $\xi = 0,70$ ;

для подовых горелок  $\xi = 0,90$ .

6.1.21 Средняя расчетная температура газов в топочном объеме

$$\bar{T}_r = 0,84 \left[ (T_M)^4 + (T_T'')^4 \right]^{0,25}, \text{ }^\circ\text{C}.$$

6.1.22 Время пребывания газов в топочной камере

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_V \cdot \bar{T}_r \cdot v_r^п \cdot \alpha_T (1+r)}, \text{ с}.$$

6.1.23 Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке

$$\tau_p = \frac{\Delta T_p}{T_a' - T_T''} \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \cdot \tau_{\text{преб}}, \text{ с}.$$

6.1.24 Концентрация остаточного кислорода в зоне реакции

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_B^0 \left[ (\alpha_{\text{гор}} - 1) + r(\alpha_{\text{рц}} - \alpha_{\text{гор}}) \right] \cdot \rho_{O_2}}{\left[ V_r^0 + (\alpha_{\text{гор}} - 1) V_B^0 \right] (1+r)}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $\alpha_{\text{рц}}$  – избыток воздуха в газах рециркуляции,  $\rho_{O_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$  – плотность кислорода при атмосферном давлении.

Примечание: в случаях, когда  $(\alpha_{\text{гор}} - 1)$  окажется меньше 0,02, условно принимать его постоянным и равным 0,02.

6.1.25 Концентрация оксидов азота, образующихся за счет термической реакции в зоне ядра факела, в перерасчете на диоксид азота

$$\text{NO}_2^{\text{тп}} = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2} \exp\left(-\frac{10860}{T_M}\right) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \text{ г/м}^3.$$

6.2 Концентрация топливных и быстрых оксидов азота

Образование этого вида оксидов азота происходит в диапазоне температур 800–2100 К и наибольшую интенсивность имеет в области 1850 К.

6.2.1 При значении температуры  $2100 > T_M \geq 1850$  К

$$\text{NO}_2^{\text{тл}} = (0,4 - 0,1 \cdot N^p) \cdot N^p \cdot \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{2100 - T_M}{125} \right)^{0,33}, \text{ г/м}^3.$$

6.2.2 При значениях температуры  $1850 > T_M > 800$  К

$$\text{NO}_2^{\text{тл}} = 1,25 \cdot (0,4 - 0,1 \cdot N^p) \cdot N^p \cdot \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}, \text{ г/м}^3.$$

6.3 Суммарная концентрация оксидов в газах

$$\text{NO}_2^0 = \text{NO}_2^{\text{тп}} + \text{NO}_2^{\text{тл}}, \text{ г/м}^3.$$

6.4 Суммарный выход оксидов азота при любой пониженной нагрузке

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^{\text{тп}} \frac{D}{D_{\text{ном}}} + \text{NO}_2^{\text{тл}} \left( \frac{D}{D_{\text{ном}}} \right)^{0,5}, \text{ г/м}^3,$$

где  $\frac{D}{D_{\text{ном}}}$  – отношение расчетной нагрузки котла и номинальной.

6.5 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. Ввиду отсутствия в природном газе топливного азота, входящего в радикалы, но при наличии углеводородных соединений при сгорании газа могут образовываться только быстрые оксиды азота:

$$\text{NO}_2^6 = 0,1 \left( \frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \left( \frac{T_M' - 800}{1000} \right)^{0,33}.$$

## 7 Перерасчет концентраций загрязнений веществ для коэффициентов избытка воздуха отличных от $\alpha = 1,4$

7.1 Основной показатель норматива удельного выброса загрязняющего воздуха  $n$ , г/МДж.

Примечание: Для данного типа котла в зависимости от его тепловой мощности и вида сжигаемого топлива по соответствующей таблице (см. прил. 2, 3).

7.2 Допустимая концентрация загрязняющего вещества при нормальных условиях

$$\mu = n \cdot \frac{Q_{\text{н}}^p}{V_{\text{г}}} \cdot 10^3, \text{ мг/м}^3,$$

где  $V_{\text{г}}$  – объем дымовых газов при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $101,3$  кПа,  $V_{\text{г}} = V_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ), где  $V_{\text{г}}^0$  – теоретическое количество дымовых газов,  $\text{м}^3/\text{кг}$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ );  $V^0$  – теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{кг}$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ );  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безгрешнов А.Н., Липов Ю.М., Шлейфер Б.М. Расчет паровых котлов в примерах и задачах. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
2. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
3. Тепловой расчет котлов: (Нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
4. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов / И.Д. Фурсов, В.В. Коновалов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2001. – 266 с.

Таблица 1.1. – Значения  $\eta_{\text{SO}_2}^1$  при факельном сжигании различных видов топлива

Вид топлива	$\eta_{\text{SO}_2}^1$
Торф	0,15
Сланцы эстонские и ленинградские	0,8
Сланцы других месторождений	0,5
Мазут	0,02
Газ	0,01
Экибастузский уголь	0,02
Березовские угли Канско-Ачинского бассейна	
Для топок с ТШУ	0,5
Для топок с ЖШУ	0,2
Другие угли Канско-Ачинского бассейна	
Для топок с ТШУ	0,2
Для топок с ЖШУ	0,05
Угли других месторождений	0,1

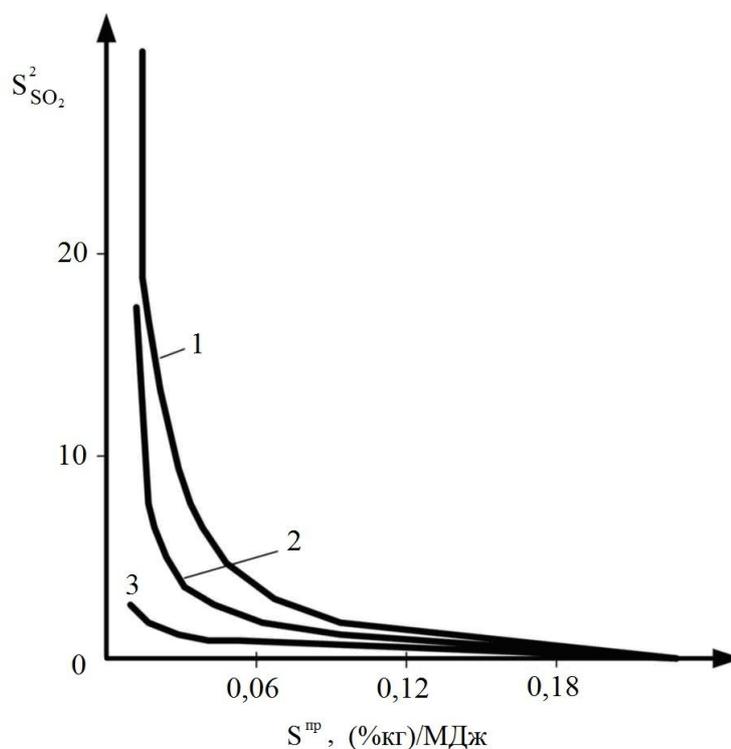


Рис. 1. Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях в зависимости от приведенной сернистости топлива и щелочности орошаемой воды:  
1–3 – щелочность орошаемой воды, соответственно 10, 5, 0 мг-экв/л

Таблица 2.1. – Нормативы удельных выбросов в атмосферу твердых частиц котельных установок для твердого топлива всех видов

Тепловая мощность котлов, $Q$ , МВт (паропроизводительность, т/ч)	Приведенное содержание золы $A^{пр}$ , $\frac{\%кк}{МДж}$	Ввод котельных установок на ТЭС с 01.01.2001 г.		
		Массовый выброс твердых частиц на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс твердых частиц, кг/ту.т.	Массовая концентрация частиц в дымовых газах при $\alpha = 1,4$ , мгм <sup>3</sup>
до 229 (до 420)	менее 0,6	0,06	1,76	150
	0,6–2,5	0,06–0,10	1,76–2,93	150–250
	более 2,5	0,1	2,93	250
300 и более (420 и более)	менее 0,6	0,02	0,59	50
	0,6–2,5	0,02–0,06	0,59–1,76	50–50
	более 2,5	0,06	1,78	150

Таблица 2.2. – Нормативы удельных выбросов в атмосферу оксидов серы котельных установок для твердых и жидких топлив

Тепловая мощность котлов, $Q$ , МВт (паропроизводительность, т/ч)	Приведенное содержание серы $S^{пр}$ , $\frac{\%кк}{МДж}$	Ввод котельных установок на ТЭС с 01.01.2001 г.		
		Массовый выброс $SO_x$ на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс $SO_x$ , кг/ту.т.	Массовая концентрация $SO_x$ в дымовых газах при $\alpha = 1,4$ , мг/м <sup>3</sup>
до 199 (до 320)	0,045 и менее	0,5	14,7	1200
	более 0,045	0,6	17,6	1400
200–249 (320–400)	0,045 и менее	0,4	11,7	950
	более 0,045	0,45	13,1	1050
250–299 (400–420)	0,045 и менее	0,3	8,8	700
	более 0,045	0,3	8,8	700
300 и более (420 и более)	0,045 и менее	0,3	8,8	700
	более 0,045	0,3	8,8	700

Таблица 3.1. – Нормативы удельных выбросов в атмосферу оксидов азота для котельных установок

Тепловая мощность котлов, $Q$ , МВт (паропроизводительность, т/ч)	Вид топлива, вид шлакоудаления		Ввод котельных установок на ТЭС с 01.01.2001 г.		
			Массовый выброс NO на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс NO, кг/ту.т	Массовая концентрация NO <sub>x</sub> в дымовых газах при $\alpha = 1,4$ , мг/м <sup>3</sup>
до 299 (до 420)	газ		0,043	1,26	125
	мазут		0,086	2,52	250
	бурый уголь	ТШУ	0,11	3,20	300
		ЖШУ	0,11	3,20	300
	Каменный уголь	ТШУ	0,17	4,98	470
		ЖШУ	0,23	6,75	640
300 и более (420 и более)	газ		0,43	1,26	125
	мазут		0,86	2,52	250
	Бурый уголь	ТШУ	0,11	3,20	300
		ЖШУ	–	–	–
	Каменный уголь	ТШУ	0,13	3,81	350
		ЖШУ	0,21	6,16	570

Учебное издание

## РАСЧЕТ ВАЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ТЭС

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Методы защиты окружающей среды»,  
для студентов IV курса, обучающихся по направлению  
141100 «Энергетическое машиностроение»

*Составители*

ВИЗГАВЛЮСТ Наталья Викторовна  
КУЛЕШ Роман Николаевич  
БУВАКОВ Константин Владимирович

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати . Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. . Уч.-изд.л. .  
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)