

066

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования**

**Санкт-Петербургский государственный технологический  
университет растительных полимеров**

---

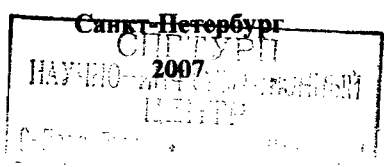
**Кафедра охраны окружающей среды и рационального использования  
природных ресурсов**

# **Промышленная экология**

**Методическое пособие  
для выполнения контрольных работ**

**Факультет - заочный**

**Специальность – 280201 «Охрана окружающей среды и рациональ-  
ное использование природных ресурсов»**



## УДК 502.3 (075)

Промышленная экология: методическое пособие для выполнения контрольных работ / сост. Т.И. Буренина, Л.Н. Григорьев, О.А. Шанова; ГОУВПО СПбГТУРП. СПб., 2007-25 с.: табл. 5, ил. 1.

Методическое пособие состоит из контрольных работ в соответствии с рабочей программой дисциплины «Промышленная экология».

Предназначается для студентов заочной формы обучения по специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов».

Рецензенты: профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов СПбГТУРП, канд. техн. наук Л.М. Исянов.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ГОУВПО СПбГТУРП (протокол № 2 от 09.11.07).

Утверждено к изданию методической комиссией инженерно-экологического факультета ГОУВПО СПбГТУРП (протокол № 6 от 15.04.07).

---

Редактор и корректор Т.А. Смирнова  
Техн. редактор Л.Я. Титова

---

Подп. к печати 13.12.07. Формат 60 X 84/16. Бумага тип. № 1.  
Печать офсетная. Объем 1,75 п.л., 1,75 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.  
Изд. № 151. Цена «С». 30223 / 1614.

---

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© ГОУВПО Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
университет растительных полимеров, 2007

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать общую характеристику дымовых газов, образующихся при сжигании энергетических топлив. Показать различие характеристик в зависимости от сжигаемого топлива.
2. Химизм образования при сжигании топлив оксидов серы и углерода. Каково соотношение между оксидами в зависимости от условий сжигания топлива?
3. Химизм образования оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). Основные факторы, влияющие на выход  $\text{NO}_x$  при сжигании топлива.
4. Дать характеристику технологических способов сокращения выхода  $\text{SO}_2$  при сжигании топлива.
5. Дать характеристику технологических способов сокращения выхода  $\text{NO}_x$  при сжигании топлива.
6. Условия образования и характеристика выбросов литейного производства.
7. Условия образования и характеристика выбросов гальванического производства и автотранспорта.
8. Характеристика выбросов в атмосферу при плазменной резке металлов. Технологические методы сокращения выхода  $\text{NO}_x$ , аэрозолей.
9. Обезвреживание выбросов в атмосферу от паров органических веществ. Схемы установок каталитического дожигания.
10. Дать характеристику установок каталитического дожигания  $\text{NO}_x$  в системе энергетического котлоагрегата.
11. Составить и дать характеристику схемы установки очистки дымовых газов ТЭЦ от  $\text{SO}_2$ .
12. Характеристика золошлаковых отходов и основные направления их утилизации.
13. Характеристика пластмассовых отходов и способы их утилизации.

14. Характеристика отходов гальванического производства и способы их утилизации.
15. Характеристика способов утилизации нефтеотходов и отходов тепловой резки металлов.
16. Способы утилизации из дымовых газов  $\text{SO}_2$ .
17. Образование и характеристика выбросов в атмосферу при периодической и непрерывной варках целлюлозы по сульфатному способу. Технологические методы сокращения выбросов загрязняющих веществ при варке целлюлозы.
18. Образование и характеристика выбросов при выдувке (промывке) массы из котла и выпаривании черных щелоков. Сокращение выбросов загрязняющих веществ технологическими методами.
19. Образование и характеристика выбросов в атмосферу при сжигании черных щелоков и регенерации извести. Технологические методы их сокращения.
20. Образование и характеристика выбросов деревообрабатывающих производств. Технологические методы их сокращения.
21. Образование и характеристика выбросов сульфатно-целлюлозного производства.

### Задание № 1.

Определить объём выбросов ( $\text{нм}^3/\text{ч}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), количество загрязняющих веществ ( $\text{г/с}$ ,  $\text{кг/с}$ ), выделяющихся в производстве целлюлозы по сульфатному способу, их концентрации в пересчете на нормальные ( $\text{г/нм}^3$ ) и рабочие ( $\text{г/м}^3$ ) условия выброса. Необходимые исходные данные для расчета приведены в таблице 1, а также в источнике «Очистка и рекуперация промышленных выбросов»/ Максимов В.Ф. и др.: учебник для вузов.-М.: «Лесн. пром-ть», 1989. - с.103-119.

#### *Пример расчета.*

Вариант 0.

Определяем часовой расход целлюлозы:  $Q = 2000/24 = 83,3 \text{ т/ч}$ .

Определяем объём выбросов:  $V = 7250 \cdot 83,3 = 603925 \text{ нм}^3 \text{ с.г./ч}$ ,  
где  $7250 \text{ нм}^3 \text{ с.г./т ц-зы}$  – удельный объём выбросов.

Пересчитываем  $V$  с учетом влажности:

$$V_1 = 603925 + 603925 \cdot 0,2 = 724710 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Определяем объём выбросов при рабочих условиях:

$$V_2 = 724710 \cdot (435/273) = 1154758 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Рассчитываем выход загрязняющих веществ:

$$Q_{\text{H}_2\text{S}} = 72 \cdot 83,3 = 5997,6 \text{ г/ч} = 5,998 \text{ кг/ч} = 1,666 \text{ г/с}$$

$$Q_{\text{MM}} = 0$$

$$Q_{\text{SO}_2} = 10100 \cdot 83,3 = 841330 \text{ г/ч} = 841,3 \text{ кг/ч} = 233,7 \text{ г/с}$$

$$Q_{\text{пыль}} = 54720 \cdot 83,3 = 4558176 \text{ г/ч} = 4558,176 \text{ кг/ч} = 1266,2 \text{ г/с}$$

Расчет концентраций загрязняющих веществ:

- при нормальных условиях

$$C_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{5997,6}{724710} = 0,008 \text{ г/нм}^3 ;$$

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{841330}{724710} = 1,161 \text{ г/нм}^3 ;$$

$$C_{\text{пыль}} = \frac{4558176}{724710} = 6,289 \text{ г/нм}^3 ;$$

- при рабочих условиях

$$C_{H_2S} = \frac{5997.6}{1154758} = 0,005 \text{ г/м}^3 ;$$

$$C_{SO_2} = \frac{841330}{1154758} = 0,728 \text{ г/м}^3 ;$$

$$C_{пыль} = \frac{4558176}{1154758} = 3,947 \text{ г/м}^3 .$$

### Задание №2

Определить количество загрязняющих веществ, выделяющихся с поверхности гальванических ванн.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2. (где \* – Pнас для  $H_3PO_4 = 127,8$  мм рт. ст.).

#### *Пример расчета*

Ванны травления.

Габариты: длина x ширина:	1,3 x 0,75 м
	0,9 x 0,6 м
Состав жидкости в 1-й ванне	30% HCl, 70% H <sub>2</sub> O
Состав жидкости во 2-й ванне	40% HCl, 60% H <sub>2</sub> O
Давление воздуха	101325 Па
Температура газовой среды и жидкости	25 °С
Объём выбросов	4,85 м <sup>3</sup> /с

Рассчитываем относительные молекулярные массы составляющих газовой фазы:

$$M_{HCl} = 36,5 \text{ кг/кмоль}, \quad M_{H_2O} = 18,0 \text{ кг/кмоль}.$$

Определяем мольную долю загрязняющего вещества в жидкой фазе по фор-

муле:

$$n_i = \frac{a_i / M_i}{\sum a_i / M_i},$$

где  $a_i$  – массовые доли компонентов, входящих в состав жидкости в ванне.

Таблица 1. Исходные данные

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Источник выбросов	СРКА без испарителя	ИРП	Растворитель плава	Терпентинный конденсатор	Выдувной резервуар	Окислительная установка	Конденсатор выпарной установки	СРКА с испарителем	ИРП	МРКА
Выход целлюлозы, т/сут	2000	2000	1000	1300	2000	2000	2000	1000	1000	1300
Температура выбросов, К	423	435	363	310	315	350	308	430	428	435
Содержание водяных паров, % об.	20,0	25,0	76,0	4,5	5,1	41,3	3,5	19,3	26,4	21,0

Таблица 2. Исходные данные

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Наименование операции	обезжиривание	удаление нагара	цианистое меднение	снятие хромового покрытия	травление	удаление нагара	травление	цианистое меднение	обезжиривание	снятие хромового покрытия
Состав жидкости в ванне	ацетон	$H_3PO_4$ $H_2O$	$HCN$ $H_3PO_4$ $H_2O$	$HCl$ $H_2O$	$HCl$ $H_2O$	$H_3PO_4$ $H_2O$	$HF$ $H_2O$	$HCN$ $H_3PO_4$ $H_2O$	бензин бензол	$HCl$ $H_2O$
Концентрации компонентов в жидкости, соответственно по составу	-	600 г/л	90 г/л 100 г/л	60%	300 г/л	40%	150 г/л	120 г/л 150 г/л	-	50%
Габариты ванны, м										
длина	1.2	1.4	0.8	0.7	0.9	1.3	1.7	1.0	0.8	0.9
ширина	0.7	0.6	0.4	0.4	0.7	0.8	0.6	0.5	0.6	0.6
Температура газовой среды, °С	21	53	47	30	21	70	27	45	27	29
Температура кипения ЗВ, К	330	*	$HCN$ - 299 $H_3PO_4$ -*	358	358	-	293	$HCN$ - 299 $H_3PO_4$ -*	бензин - 470 бензол - 353	358
Параметры источника загрязнения от ванн, м										
длина	1.3	0.4	0.35	диаметр	-	0.7	-	-	-	диаметр
ширина	0.6	0.5	0.4	0,9 м	-	0.5	-	-	-	0,9 м
Скорость воздуха в воздуховоде, м/с	2.0	8,44	6,01	7.61	-	8,1	-	-	-	4,75
Объём выбросов, м <sup>3</sup> /с	-	-	-	-	4,9	-	3,4	5,0	0,95	-



1- я ванна:

$$n_{\text{HCl}} = \frac{0.3/36.5}{0.3/36.5 + 0.7/18.0} = 0,17.$$

2- я ванна:

$$n_{\text{HCl}} = \frac{0.4/36.5}{0.4/36.5 + 0.6/18.0} = 0,25.$$

Рассчитываем давление насыщенных паров (мм рт. ст.) компонентов над чистыми веществами:

$$\lg P_{\text{нас}}^1 = 2,763 - 0,019 \cdot t_{\text{кип}} + 0,024 \cdot t_{\text{г}},$$

где  $t_{\text{кип}}$  – температура кипения ЗВ, °С;

$t_{\text{г}}$  – температура газовой среды, °С.

Для загрязняющего вещества в примере –  $t_{\text{кип}}(\text{HCl}) = 85^\circ\text{C}$ .

$$\lg P_{\text{нас}}^1 = 2,763 - 0,019 \cdot 85 + 0,024 \cdot 21 = 1,65,$$

отсюда  $P_{\text{нас}}^1 = 41,9$  мм рт. ст.

Далее рассчитываем парциальное давление HCl над жидкостью:

$$P^i = P_{\text{нас}}^1 \cdot n_i$$

1- я ванна

$$P^{\text{HCl}} = 41,9 \cdot 0,17 = 7,123 \text{ мм рт. ст.} = 949,5 \text{ Па} \quad (1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}).$$

2- я ванна

$$P^{\text{HCl}} = 41,9 \cdot 0,25 = 10,475 \text{ мм рт. ст.} = 1396,3 \text{ Па.}$$

Количество выделяющейся хлороводородной кислоты (г/ч) из ванн травления:

$$G = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot \omega) \cdot F \cdot P^1 \cdot \sqrt{M_i} \cdot \frac{K_2}{K_1},$$

где  $\omega$  – скорость движения воздуха над поверхностью ванны, м/с;

$F$  – поверхность испарения, м<sup>2</sup>;

$P^1$  - парциальное давление компонента над жидкостью, Па;

$K_1$  - коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения.

Коэффициент  $K_1$  выбирается в зависимости от температуры кипения жидкости. Значения  $K_1$  приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициента  $K_1$

Температура кипения жидкости, °С	≤ 80	100	150	> 150
Поправочный коэффициент $K_1$	1,5	1,3	1,1	1,0

Примем  $K_1 = 1,5$ .

$K_2$  - коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения,  $K_2 = 1$  (при открытой поверхности испарения).

Найдем поверхность испарения для каждой ванны:

1- я ванна

$$F_1 = 1,3 \times 0,75 = 0,975 \text{ м}^2;$$

2- я ванна

$$F_2 = 0,9 \times 0,6 = 0,54 \text{ м}^2.$$

Скорость движения воздуха над поверхностью  $\omega$  можно определить, зная количество воздуха, отсасываемого от ванн травления и габариты ванн.

1- я ванна

$$\omega_1 = \frac{4,85}{0,975} = 4,9 \text{ м/с}$$

2- я ванна

$$\omega_1 = \frac{4,85}{0,54} = 8,98 \text{ м/с}$$

Тогда количество выделяющейся хлороводородной кислоты из ванн травления будет равно:

1-я ванна

$$G_1 = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot 4,9) \cdot 0,975 \cdot 949,5 \cdot \sqrt{36,5} \cdot \frac{1}{1,5} = 704,97 \text{ г/ч} = 0,20 \text{ г/с}$$

2-я ванна

$$G_2 = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot 8,98) \cdot 0,54 \cdot 1396,3 \cdot \sqrt{36,5} \cdot \frac{1}{1,5} = 573,22 \text{ г/ч} = 0,15 \text{ г/с}$$

г/с.

Общее количество хлороводородной кислоты, выбрасываемое в атмосферу – 0,35 г/с.

### Задание №3

Выполнить расчет выбросов и концентраций загрязняющих веществ от котельной.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.

Принять фактическую паропроизводительность котла 25 т пара/ч, рециркуляция дымовых газов отсутствует.

При работе котлов на мазуте расчет производится по оксидам азота, диоксиду серы, оксиду углерода, мазутной золе, саже.

При работе котлов на угле расчет производится по оксидам азота, диоксиду серы, оксиду углерода, летучей золе, саже.

При работе котлов на газе расчет производится по оксидам азота.

Максимально разовый выброс оксидов азота  $M_{NOx}$  (г/с) при работе котлов на газе определяется по формуле:

$$M_{NOx} = V \cdot Q_i \cdot K_{NO2} \cdot \beta_K \cdot \beta_t \cdot \beta_\alpha \cdot (1 - \beta_r),$$

где  $V$  – максимальный расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$Q_i$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

Таблица 4. Исходные данные

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Топливо	мазут малосернистый	мазут малосернистый	уголь Кузнецкий марки С	уголь Подмосковский	мазут малосернистый	уголь Воркутинский марки Ж	газ резервное - мазут малосернистый	газ	газ/ резервное - уголь Печерский марки Ж	газ
Расход топлива, кг/ч (м <sup>3</sup> /ч – газ)	3040	2800	6340	9000	3400	5900	3200/ 3100	3200	2500/ 5000	3250
Температура дымовых газов, °С	150	130	140	155	160	145	140	130	148	150
Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	1,1	1,15	1,4	1,6	1,08	1,5	1,07 / 1,17	1,1	1,07 / 1,7	1,1
$A^p$ , %	0,14	0,12	16,2	25,2	0,14	23,6	- / 0,13	-	- / 23,6	-
$S^p$ , %	0,5	2,0	0,3	1,7	0,5	0,8	- / 0,5	-	- / 0,8	-
Нижшая теплота сгорания угля, мазута, $Q_i^r$ , МДж/кг	40,61	40,40	25,13	9,88	40,61	20,60	40,61	-	20,60	-
Нижшая теплота сгорания газа, $Q_i$ , МДж/кг	-	-	-	-	-	-	33,52	33,52	33,52	33,52
Эффективность улавливания твердых частиц, %	0	10	68	70	9	73	0	0	81	0
Доля золы, уносимой газами из топки котла, $a_{гн}$	0,85	0,95	0,25	0,20	0,85	0,25	0 / 0,85	0	0 / 0,25	0

$K_{NO_2}$  - удельный выброс оксидов азота при сжигании газа, г/МДж,

определяется для паровых котлов по формуле  $K_{NO_2} = 0,01 \sqrt{D} + 0,03$ ,

где  $D$  – фактическая паропроизводительность котла, т/ч;

$\beta_K$  - безразмерный коэффициент, учитывающий конструкцию горелки,

принять  $\beta_K = 1$ ;

$\beta_1$  - безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горелки, принять  $\beta_1 = 1$ ;

$\beta_\alpha$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов азота, принять  $\beta_\alpha = 1,225$ ;

$\beta_r$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов,  $\beta_r = 0,16 \sqrt{r}$ , где  $r$  – степень рециркуляции дымовых газов, %.

Максимально разовый выброс оксидов азота  $M_{NOx}$  (г/с) при работе котлов на угле определяется по формуле:

$$M_{NOx} = V \cdot Q_i^r \cdot K_{NO_2} \cdot \beta_r,$$

где  $V$  – максимальный расход топлива, кг/с;

$Q_i^r$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$K_{NO_2}$  - удельный выброс оксидов азота при слоевом сжигании твердого топлива, г/МДж, определяется по формуле:

$$K_{NO_2} = 11,0 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot (1 + 5,46 \cdot (1 - (R_\sigma / 100))) \cdot \sqrt[4]{Q_i^r \cdot q_r},$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха в топке;

$R_\sigma$  - характеристика гранулометрического состава угля – остаток на сите с размером ячеек 6 мм, %; принять  $R_\sigma = 40\%$ .

$q_r$  - тепловое напряжение зеркала горения, МВт/м<sup>2</sup>, принять  $q_r = 1,3$ ;

$\beta_r$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов, подаваемых в смеси с дутьевым воздухом, на образование оксидов азота, принять  $\beta_r = 1$ .

Максимально разовый выброс *оксидов азота* (в пересчете на диоксид азота)  $M_{NOx}$  (г/с) при работе котлов **на мазуте** определяется по формуле:

$$M_{NOx} = B \cdot Q_i^r \cdot K_{NO2},$$

где  $B$  - максимальный расход топлива, кг/с;

$Q_i^r$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$K_{NO2}$  - удельный выброс оксидов азота при слоевом сжигании мазута, г/МДж, определяется по формулам:

для паровых котлов 
$$K_{NO2} = 0,01 \sqrt{D} + 0,1,$$

где  $D$  - фактическая паропроизводительность котла, т/ч;

для водогрейных котлов 
$$K_{NO2} = 0,0113 \sqrt{Q_T} + 0,1,$$

где  $Q_T$  - фактическая тепловая мощность котла, МВт, определяется по формуле  $Q_T = B \cdot Q_i^r$ .

Максимально разовый выброс *диоксида серы*  $M_{SO2}$  (г/с) определяется по формуле:

$$M_{SO2} = 0,02 \cdot B \cdot S^p \cdot (1 - \eta'_{SO2}) \cdot (1 - \eta''_{SO2}),$$

где  $B$  - максимальный расход топлива, г/с;

$S^p$  - содержание серы в топливе, %;

$\eta'_{SO2}$  - доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива, для мазута - 0,02; для угля - 0,1;

$\eta''_{SO2}$  - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе, принимать равной нулю.

Максимально разовый выброс *мазутной золы*  $M_{M3}$  (г/с) в пересчете на ванадий определяется по формуле:

$$M_{M3} = 0.278 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot G_V \cdot (1 - \eta_{oc}) \cdot (1 - (\eta_{3y} / 100)),$$

где  $V$  – максимальный расход топлива, т/ч;

$G_V$  - количество ванадия, находящегося в 1т мазута, г/т,

определяется по формуле:  $G_V = 2222 \cdot A^P$ , где  $A^P$  - зольность топлива, %;

$\eta_{oc}$  - доля ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхности нагрева мазутных котлов, принимать равным 0,05;

$\eta_{3y}$  - степень очистки дымовых газов от мазутной золы в золоулавливающих установках, %, принимать равной нулю.

При сжигании угля образуются твердые частицы, состоящие из *летучей золы* и несгоревшего топлива – *сажи*. Максимально разовый выброс *летучей золы*  $M_{ЛЗ}$  (г/с) определяется по формуле:

$$M_{ЛЗ} = 0.01 \cdot V \cdot a_{yn} \cdot A^P \cdot (1 - \eta_3),$$

где  $V$  – максимальный расход топлива, г/с;

$a_{yn}$  - доля золы, уносимой газами из топки котла;

$A^P$  - зольность топлива, %;

$\eta_3$  - доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях.

Количество *несгоревшего топлива (сажи)*  $M_C$  (г/с), образующееся при сжигании *угля и мазута*, определяется по формуле:

$$M_C = 0.01 \cdot V \cdot q_4 \cdot \frac{Q_i^r}{32.68} \cdot (1 - \eta_3),$$

где  $V$  – максимальный расход топлива, г/с;

$q_4$  - потери тепла с уносом вследствие механической неполноты сгорания топлива, %;  $q_4 = 0,1\%$  для мазута,  $q_4 = 1-10\%$  для угля;

$Q_i^r$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$\eta_3$  - доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях.

Максимально разовый выброс оксида углерода  $M_{CO}$  (г/с) определяется по формуле:

$$M_{CO} = 0.001 \cdot B \cdot q_3 \cdot R \cdot Q_i^f \cdot (1 - (q_4 / 100)),$$

где  $B$  – максимальный расход топлива, г/с;

$q_3$  - потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива, %;  $q_3 = 0.05 - 0.1\%$  для мазута,  $q_3 = 0.1-10\%$  для угля;

$Q_i^f$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$R$  - коэффициент, зависящий от вида топлива, для мазута – 0,65, для угля – 1,0;

$q_4$  - потери тепла с уносом вследствие механической неполноты сгорания топлива, %.

Для расчета концентраций загрязняющих веществ необходимо определить количество дымовых газов, образующихся при сжигании топлива, м<sup>3</sup>/с:

$$V = \frac{B \cdot V_f \cdot (273 + t_f)}{273},$$

где  $B$  – максимальный расход топлива, кг/с;

$V_f$  - выход продуктов сгорания топлива, м<sup>3</sup>/кг;

$t_f$  - температура дымовых газов, °С.

$$V_f = V_f^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $V_f^0$  - выход продуктов сгорания топлива при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup>/кг;

$V^0$  - теоретически необходимое количество воздуха, необходимое для полного сжигания топлива ( $\alpha = 1$ ), м<sup>3</sup>/кг;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Значения  $V_f^0$  и  $V^0$  выбираются из справочника «Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод» М., Энергия, 1973. – 728 с.



### **Пример расчета.**

Топливо – мазут малосернистый.

Максимальный расход топлива – 2300 кг/ч.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,18$ .

Зольность топлива  $A^P = 0,14 \%$ .

Содержание серы в топливе  $S^P = 0,5 \%$ .

Эффективность улавливания твердых частиц  $\eta = 35 \%$ .

Низшая теплота сгорания топлива  $Q_i^r = 40,61$  МДж/кг.

Температура дымовых газов  $130^\circ\text{C}$ .

Фактическая паропроизводительность котла 25 т/ч.

Рециркуляция дымовых газов отсутствует.

Рассчитаем количество дымовых газов, образующихся при сжигании мазута:

$$V = \frac{2300 \cdot 13,39 \cdot (273 + 130)}{273} = 12,63 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $V_r = 11,48 + (1,18 - 1) \cdot 10,62 = 13,39$   $\text{нм}^3/\text{кг}$ .

Максимально разовый выброс оксидов азота (в пересчете на диоксид азота):

$$M_{\text{NOx}} = (2300/3600) \cdot 40,61 \cdot 0,15 = 3,89 \text{ г/с},$$

где  $K_{\text{NO}_2} = 0,01 \sqrt{25} + 0,1 = 0,15$  г/МДж.

Концентрация оксидов азота:

$$C_{\text{NOx}} = \frac{M_{\text{NOx}}}{V} = \frac{3,89}{12,63} = 0,308 \text{ г/м}^3.$$

Максимально разовый выброс диоксида серы:

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot \frac{2300 \cdot 1000}{3600} \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,02) \cdot (1 - 0) = 6,39 \text{ г/с}.$$

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{6,39}{12,63} = 0,504 \text{ г/м}^3.$$

Максимально разовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий:

$$M_{M3} = 0.278 \cdot 10^{-3} \cdot 2.3 \cdot 310.4 \cdot (1 - 0.05) \cdot (1 - 0) = 0,2 \text{ г/с,}$$

где  $G_V = 2222 \cdot 0,14 \approx 310,4 \text{ г/т}$

$$C_{M3} = \frac{0.2}{12.63} = 0,016 \text{ г/м}^3.$$

Максимально разовый выброс сажи:

$$M_c = 0.01 \cdot \frac{2300 \cdot 1000}{3600} \cdot 0.1 \cdot \frac{40.61}{32.68} \cdot (1 - 0.35) = 0,52 \text{ г/с}$$

$$C_c = \frac{0.52}{12.63} = 0,04 \text{ г/м}^3.$$

Максимально разовый выброс оксида углерода:

$$M_{CO} = 0.001 \cdot \frac{2300 \cdot 1000}{3600} \cdot 0.05 \cdot 0.65 \cdot 40.61 \cdot (1 - 0.01) = 0,84 \text{ г/с}$$

$$C_{CO} = 0,067 \text{ г/м}^3.$$

#### Задание № 4

Определить выход оксидов азота, образующихся при сжигании топлива. Расчетным и графическим способами показать влияние температуры в топке на выход NO. Рассчитать эффективность рециркуляции.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 5.

Для расчета **выхода NO**  $C_{NO}^T$  (г/м<sup>3</sup>) используем формулу:

$$C_{NO}^T = \eta \cdot C_{NO}^{равн} \cdot M_{NO} \cdot 1000 ,$$

где  $\eta$  - безразмерный параметр;

$C_{NO}^{равн}$  - равновесная концентрация NO, моль/л;

$M_{NO}$  - молекулярная масса NO, г/моль.

Равновесную концентрацию NO  $C_{NO}^{равн}$  можно найти из выражения:

$$C_{NO}^{равн} = \sqrt{21.3 \cdot e^{-43000/R \cdot T} \cdot C_{N_2}^T \cdot C_{O_2}^T},$$

где  $C_{N_2}^T$  - концентрация азота в топке, моль/л;

$C_{O_2}^T$  - концентрация кислорода в топке, моль/л;

43000 – энергия активации, кал/моль;

R – газовая постоянная, кал/моль\*К, R = 1,98 кал/моль\*К;

$T_T$  – температура в топке, К.

Концентрации азота и кислорода в топке находят из следующих формул:

$$C_{N_2}^T = P_{\text{общ}} \cdot C_{N_2} \cdot \frac{1}{62 \cdot T_{\text{возд}}}$$

$$C_{O_2}^T = P_{\text{общ}} \cdot C_{O_2} \cdot \frac{1}{62 \cdot T_{\text{возд}}}$$

где  $P_{\text{общ}}$  – общее давление, мм рт.ст.;

$C_{O_2}$  – концентрация кислорода, моль/л;

$C_{N_2}$  – концентрация азота, моль/л;

$T_{\text{возд}}$  – температура воздуха, подаваемого в топку, К.

Параметр  $\eta$  характеризует отношение концентрации NO, превращенного из  $N_2$  и  $O_2$ , к концентрации NO, образующегося в зоне горения.

$$\eta = \eta_T / \eta_0$$

$$\eta_0 = [(4 \cdot K_{TT} \cdot R \cdot C_{NO}^{\text{равн}}) / 43000 \cdot \alpha]^{0.2}$$

где  $K_{TT}$  – константа разложения NO, 1/моль\*с,

$$K_{TT} = 5,4 \cdot 10^{12} \cdot e^{-43000/T_T}$$

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий скорость охлаждения газов от температуры в зоне горения до температуры выбрасываемых газов.

$$\eta_T = \frac{1,1}{1 + 0,06 \cdot C}$$

где C – параметр, рассчитываемый по формуле:

$$C = \frac{[\eta_1(\varepsilon) - \eta_2(\varepsilon)] \cdot [\eta_3(\varepsilon) - \eta_0]}{[\eta_1(\varepsilon) - \eta_3(\varepsilon)] \cdot [\eta_2(\varepsilon) - \eta_0]}$$

Величины  $\eta_1(\varepsilon)$ ,  $\eta_2(\varepsilon)$ ,  $\eta_3(\varepsilon)$  рассчитываются в зависимости от значения  $\eta_0$ :

при  $0 < \eta_0 \leq 0,75$

$\eta_1(\epsilon) = 1, \eta_2(\epsilon) = 0, \eta_3(\epsilon) = 1,10.$

### **Пример расчета.**

В каждом варианте рассчитывается концентрация образующегося оксида азота для условий а); затем определяем влияние температуры в топке Тт на выход NO – условия б) и в) . Рассчитываем эффективность рециркуляции – для условий а) без рециркуляции и г) с учетом рециркуляции. Значение коэффициента  $\alpha$  принимается равным  $10^{-3}$ .

Объем природного газа - 300000 м<sup>3</sup>/год;

Объем выбросов – 3000000 м<sup>3</sup>/год;

Температура в топке Тт: а) 1127 °С, б) 1327 °С; в) 1527 °С;

Общее давление Робщ - 101308 Па;

Концентрация азота в топке  $C_{N_2}$  - 0,790 моль/л;

Температура воздуха, подаваемого в топку Твозд : а) 80 °С, г) 60 °С; д) 40 °С;

Концентрация кислорода в топке  $C_{O_2}^T$  : а) 0,080 моль/л; г) 0,040 моль/л.

#### Условия а):

Найдем значения  $C_{N_2}^T, C_{O_2}^T, C_{NO}^{равн}$  .

Робщ = 101308 Па / 133,3 = 760 мм рт ст.

Тт = 1127 °С = 1400 К, Твозд = 80 °С = 353 К.

$$C_{N_2}^T = 760 \cdot 0.790 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0274 \text{ моль/л.}$$

$$C_{O_2}^T = 760 \cdot 0.080 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0028 \text{ моль/л.}$$

$$C_{NO}^{равн} = \sqrt{21.3 \cdot e^{-\frac{43000}{1.98 \cdot 1400}} \cdot 0.0274 \cdot 0.0028} = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$$

Константа разложения NO равна:

$$K_{TT} = 5,4 \cdot 10^{12} \cdot e^{-\frac{43000}{1400}} = 0,248 \text{ (1/моль} \cdot \text{с)};$$

Таблица 5. Исходные данные

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура в топке, $T_T$ , °С										
а)	1127	1000	1050	1200	1100	1300	1050	1000	1050	1200
б)	1327	1200	1400	1300	1200	1400	1250	1200	1400	1300
в)	1527	1500	1600	1600	1400	1500	1550	1400	1600	1600
Температура воздуха, подаваемого в топку, $T_{возд}$ , °С										
	80	100	85	120	90	85	120	80	90	100
Общее давление, Робщ, Па										
	101308	102106	102640	101708	101980	101305	102500	101600	101308	102600
Концентрация азота в топке, $C_{N_2}$ , моль/л										
	0,790	0,780	0,785	0,782	0,790	0,781	0,784	0,790	0,785	0,780
Концентрация кислорода в топке, $C_{O_2}$ , моль/л										
а) без рециркуляции	0,080	0,082	0,085	0,088	0,090	0,085	0,088	0,082	0,092	0,090
г) с учетом рециркуляции	0,040	0,050	0,060	0,042	0,050	0,060	0,042	0,050	0,060	0,050

$$\eta_0 = [(4 \cdot 0.248 \cdot 1.98 \cdot 17.3 \cdot 10^{-6}) / 43000 \cdot 10^{-3}]^{0.2} = 0,060.$$

Так как  $\eta_0 = 0,060$ , то  $\eta_1(\epsilon) = 1, \eta_2(\epsilon) = 0, \eta_3(\epsilon) = 1,10$ , значит

$$C = \frac{[1 - 0] \cdot [1.10 - 0.060]}{[1 - 1.10] \cdot [0 - 0.060]} = 173.$$

$$\eta_T = \frac{1.1}{1 + 0.06 \cdot 173} = 0,097,$$

$$C_{NO}^T = \frac{0.097}{0.060} \cdot 17.3 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 1000 = 0,84 \text{ г/м}^3.$$

**Влияние температуры в точке:**

Условия б):

Найдем значения  $C_{N_2}^T, C_{O_2}^T, C_{NO}^{\text{равн}}$

Робщ = 101308 Па / 133,3 = 760 мм рт ст.

$T_T = 1327 \text{ }^\circ\text{C} = 1600 \text{ К}, T_{\text{возд}} = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ К}.$

$$C_{N_2}^T = 760 \cdot 0.790 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0274 \text{ моль/л}$$

$$C_{O_2}^T = 760 \cdot 0.080 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0028 \text{ моль/л}.$$

$$C_{NO}^{\text{равн}} = \sqrt{21.3 \cdot e^{-43000/198 \cdot 1600} \cdot 0.0274 \cdot 0.0028} = 45,6 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л}.$$

Константа разложения NO равна:

$$K_{TT} = 5,4 \cdot 10^{12} \cdot e^{-43000/1600} = 11,5 \text{ (1/моль} \cdot \text{с)};$$

$$\eta_0 = [(4 \cdot 11.5 \cdot 1.98 \cdot 45.6 \cdot 10^{-6}) / 43000 \cdot 10^{-3}]^{0.2} = 0,157.$$

$$C = \frac{[1 - 0] \cdot [1.10 - 0.157]}{[1 - 1.10] \cdot [0 - 0.157]} = 60.$$

$$\eta_T = \frac{1.1}{1 + 0.06 \cdot 60} = 0,239,$$

$$C_{NO}^T = \frac{0.239}{0.157} \cdot 45.6 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 1000 = 2,08 \text{ г/м}^3.$$

Условия в):

Найдем значения  $C_{N_2}^T$ ,  $C_{O_2}^T$ ,  $C_{NO}^{равн}$

Робщ = 101308 Па / 133,3 = 760 мм рт ст.

$T_T = 1527\text{ }^\circ\text{C} = 1800\text{ K}$ ,  $T_{везд} = 80\text{ }^\circ\text{C} = 353\text{ K}$ .

$$C_{N_2}^T = 760 \cdot 0.790 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0274 \text{ моль/л}$$

$$C_{O_2}^T = 760 \cdot 0.080 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0028 \text{ моль/л.}$$

$$C_{NO}^{равн} = \sqrt{21.3 \cdot e^{-43000/1.98 \cdot 1800} \cdot 0.0274 \cdot 0.0028} = 96,9 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$$

Константа разложения NO равна:

$$K_{TT} = 5,4 \cdot 10^{12} \cdot e^{-43000/1800} = 227,8 \text{ (1/моль} \cdot \text{с)};$$

$$\eta_0 = [(4 \cdot 227.8 \cdot 1.98 \cdot 96.9 \cdot 10^{-6}) / 43000 \cdot 10^{-3}]^{0.2} = 0,333.$$

$$C = \frac{[1 - 0] \cdot [1.10 - 0.333]}{[1 - 1.10] \cdot [0 - 0.333]} = 23.$$

$$\eta_T = \frac{1.1}{1 + 0.06 \cdot 23} = 0,462,$$

$$C_{NO}^T = \frac{0.462}{0.333} \cdot 96.9 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 1000 = 4,02 \text{ г/м}^3.$$

Таким образом, при повышении температуры в топке концентрация NO возрастает.

Влияние температуры в топке на выход NO представлено на рис. 1.

### **Эффективность рециркуляции ( $\gamma$ ):**

#### Условие г)

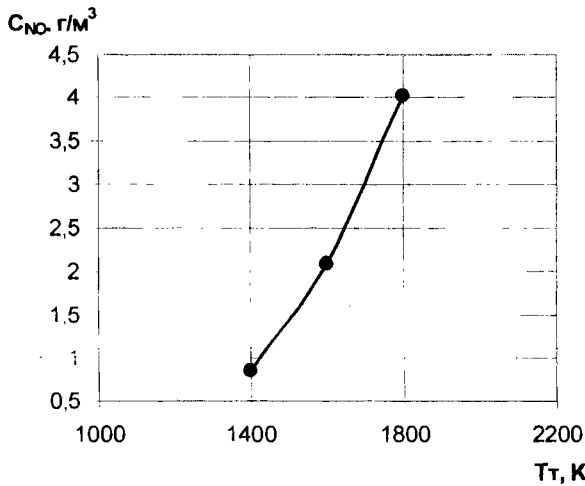
Найдем значения  $C_{N_2}^T$ ,  $C_{O_2}^T$ ,  $C_{NO}^{равн}$

$$C_{O_2} = 0,040 \text{ моль/л;}$$

Робщ = 101308 Па / 133,3 = 760 мм рт ст.

$T_T = 1127\text{ }^\circ\text{C} = 1400\text{ K}$ ,  $T_{везд} = 80\text{ }^\circ\text{C} = 353\text{ K}$ .

$$C_{N_2}^T = 760 \cdot 0.790 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0274 \text{ моль/л ;}$$



**Рис.1. Влияние температуры в топке на выход NO**

$$C_{O_2}^T = 760 \cdot 0.040 \cdot \frac{1}{62 \cdot 353} = 0,0014 \text{ моль/л.}$$

$$C_{NO}^{\text{равн}} = \sqrt{21.3 \cdot e^{-43000/198 \cdot 1400} \cdot 0.0274 \cdot 0.0014} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$$

Константа разложения NO равна:

$$K_{TT} = 5,4 \cdot 10^{12} \cdot e^{-43000/1400} = 0,248 \text{ (1/моль} \cdot \text{с);}$$

$$\eta_0 = [(4 \cdot 0.248 \cdot 1.98 \cdot 12.2 \cdot 10^{-6}) / 43000 \cdot 10^{-3}]^{0.2} = 0,056.$$

$$C = \frac{[1 - 0] \cdot [1.10 - 0.056]}{[1 - 1.10] \cdot [0 - 0.056]} = 186.$$

$$\eta_T = \frac{1.1}{1 + 0.06 \cdot 186} = 0,090,$$

$$C_{NO}^T = \frac{0.090}{0.056} \cdot 12.2 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 1000 = 0,59 \text{ г/м}^3.$$

Эффективность рециркуляции:

$$r = \frac{0.84 - 0.59}{0.84} \cdot 100\% = 29,7 \%$$



## Библиографический список

Очистка и рекуперация промышленных выбросов/ Максимов В.Ф. и др.: учебник для вузов,-М.: Лесн. пром-ть, 1989. – 416 с.

Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. изд -е.-М.: Химия, 1991 – 368 с.

Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час.-М., 1999. – 76 с.

Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод/ под ред. Н.В. Кузнецова.-М.: Энергия, 1973. – 728 с.

Григорьев Л.Н., Буренина Т.И. Промышленная экология. Часть I: учебное пособие/ СПбГТУРП, СПб.,2001. 104 с.

Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.-Л: Недра, 1988. – 313 с.



## Содержание

Контрольные вопросы.....	3
Задание №1.....	5
Задание №2.....	6
Задание №3.....	11
Задание №4.....	18
Библиографический список .....	25