

# **КОПИЯ издания**

из фонда  
научно-технической библиотеки  
Филиала ОАО «Инженерный центр ЕЭС» –  
«Фирма ОРГРЭС»

Методические указания по  
расчету выбросов оксидов  
азота с дымовыми газами  
котлов тепловых  
электростанций

СО 153-34.02.304-2003

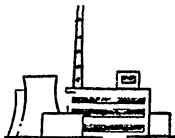
Москва

Центр производственно-технической информации  
энергопредприятий и технического обучения ОРГРЭС

Министерство энергетики  
Российской Федерации

Российское акционерное общество  
энергетики и электрификации  
«ЕЭС России»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ  
ОКСИДОВ АЗОТА  
С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ  
КОТЛОВ ТЕПЛОВЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**



**СО 153-34.02.304-2003**

**ОАО «ВТИ»  
Москва 2005**

Министерство энергетики  
Российской Федерации

Российское акционерное общество  
энергетики и электрификации  
«ЕЭС России»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ  
ОКСИДОВ АЗОТА  
С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ  
КОТЛОВ ТЕПЛОВЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

СО 153-34.02.304–2003

**Разработан** Открытым акционерным обществом "Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО «ВТИ»); Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет)" [ГОУВПО МЭИ (ТУ)]

**Исполнители** *Котлер В.Р., Енякин Ю.П., Усман Ю.М., Верещетин В.А.* (ОАО «ВТИ»), *Росляков П.В., Егорова Л.Е., Ионкин И.Л.* [ГОУВПО МЭИ (ТУ)]

**Утвержден** Министерством энергетики Российской Федерации, приказ Минэнерго России № 286 от 30.06.2003

Министр энергетики

*И.Х. Юсуфов*

**Ключевые слова:** энергетика, тепловые электростанции, котлы паровые, котлы водогрейные, выбросы оксидов азота, проектирование, реконструкция.

## СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА  
С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ КОТЛОВ  
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

СО 153-34.02.304-2003

Взамен РД 34.02.304-95

Дата введения 2003-07-01

Настоящие Методические указания могут использоваться для расчета выбросов оксидов азота при проектировании новых и реконструкции действующих котлов *паропроизводительностью от 75 т/ч и водогрейных котлов мощностью от 58 МВт (50 Гкал/ч) и выше*, сжигающих твердое, жидкое и газообразное топливо в факельных горелочных устройствах. Настоящие Методические указания могут также применяться в научно-исследовательских целях.

Настоящие Методические указания предназначены для организаций, эксплуатирующих тепловые электростанции и котельные, а также проектных организаций.

### 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сжигание топлива на тепловых электростанциях и в котельных приводит к выбросу в атмосферу продуктов сгорания органического топлива, содержащих токсичные оксиды азота  $\text{NO}_x$  (главным образом монооксид  $\text{NO}$  и в меньшей степени диоксид  $\text{NO}_2$ ).

Количество образующихся оксидов азота зависит от характеристик топлива, режимных и конструктивных параметров топочной камеры. Поэтому на стадии проектирования или реконструкции котлов необходимо провести расчет ожидаемых выбросов оксидов азота и предусмотреть меры по снижению их до величин, не превышающих нормативы удельных выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу, приведенных в ГОСТ Р 50831-95 "Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования".

В уходящих газах паровых и водогрейных котлов монооксид азота  $\text{NO}$  составляет 95-99 % общего выброса  $\text{NO}_x$ , в то время как содержание более токсичного диоксида азота  $\text{NO}_2$  не превышает 1-5 %. После выброса дымовых газов в атмосферу под воздействием природных факторов большая часть  $\text{NO}$  конвертирует в  $\text{NO}_2$ . Поэтому расчет массовых концентраций и выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  ведется в пересчете на  $\text{NO}_2$ .

В связи с установленными отдельными ПДК в атмосферном воздухе на монооксид  $\text{NO}$  и диоксид азота  $\text{NO}_2$  и с учетом трансформации оксидов азота в атмосфере при расчете загазованности и нормировании вы-

бросов ТЭС суммарные массовые выбросы оксидов азота разделяются на составляющие (с учетом различия в молярной массе этих веществ):

$$M_{\text{NO}_2} = 0,8 \cdot M_{\text{NO}_x}; \quad (1.1)$$

$$M_{\text{NO}} = (1 - 0,8) \cdot M_{\text{NO}_x} \cdot \frac{\mu_{\text{NO}}}{\mu_{\text{NO}_2}} = 0,13 \cdot M_{\text{NO}_x}, \quad (1.2)$$

где  $M_{\text{NO}}$  и  $M_{\text{NO}_2}$  – молярные массы NO и NO<sub>2</sub>, равные 30 и 46 соответственно; 0,8 – коэффициент трансформации оксида азота в диоксид. Численное значение коэффициента трансформации может устанавливаться по методике Госкомэкологии России на основании данных фактических измерений местных органов Росгидромета, но не более 0,8.

Источниками оксидов азота является молекулярный азот воздуха, используемого в качестве окислителя при горении, и азотсодержащие компоненты топлива. В связи с этим принято делить оксиды азота на воздушные и топливные. Воздушные, в свою очередь, можно разделить на термические, образующиеся при высоких температурах за счет окисления молекулярного азота воздуха, и так называемые «быстрые» оксиды азота, образующиеся во фронте факела при сравнительно низких температурах в результате реакции углеводородных радикалов с молекулой азота.

## 2 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ

Для количественной характеристики газообразных выбросов котлов используют объемные и массовые концентрации вредных веществ, а также их удельные или валовые (массовые) выбросы.

**2.1 Объемные концентрации**  $C_V$  представляют собой отношение объема, занимаемого данным газообразным веществом, к объему всей газовой пробы. Объемные концентрации  $C_V$  могут измеряться в % об или ppm. Единица измерения 1 ppm (*part per million*) представляет собой одну миллионную часть объема:

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} = 10^{-4} \% \text{ об} = 1 \text{ см}^3/\text{м}^3. \quad (2.1)$$

Важным преимуществом измерения содержания газовых компонентов в объемных концентрациях является то, что объемные концентрации не зависят от давления и температуры среды и, следовательно, расчетные или опытные результаты газового анализа, выраженные в % об или ppm, не требуют приведения к каким-либо заданным условиям по температуре и давлению.

**2.2 Массовые концентрации**  $C_m$  характеризуют количество (массу) данного вещества в одном кубическом метре продуктов сгорания. С их помощью оценивается содержание в продуктах сгорания как твердых, так и газообразных компонентов. Массовые концентрации измеряются в г/м<sup>3</sup> или мг/м<sup>3</sup>.

В отличие от объемной массовая концентрация зависит от давления и температуры среды, поэтому ее приводят в пересчете на нормальные условия (0 °С,  $p_0 = 760$  мм рт. ст. = 101,3 кПа), для чего используется следующее выражение:

$$C_m^{ny} = C_m^{оп} \cdot \frac{273 + \vartheta_r}{273} \cdot \frac{p_0}{p_r}, \quad (2.2)$$

где  $C_m^{оп}$  – массовая концентрация, полученная опытным путем при температуре  $\vartheta_r$  и давлении  $p_r$  газовой пробы.

**2.3 Связь между объемными (ppm) и массовыми (г/м<sup>3</sup>) концентрациями** устанавливается следующим соотношением:

$$C_{M_i} = k_i \cdot C_{V_i}, \quad (2.3)$$

где  $k_i$  – коэффициент пересчета, равный

$$k_i = 10^{-3} \cdot \frac{M_i}{V_{M_i}} \cdot \frac{273}{(273 + \vartheta_r)} \cdot \frac{p_r}{p_0}; \quad (2.4)$$

$M_i$  – молярная масса  $i$ -го вещества, г;  $V_{M_i}$  – его молярный объем, л (в качестве первого приближения за  $V_{M_i}$  может быть принят объем идеального газа, равный 22,41 л);  $\vartheta_r$  – температура и  $p_r$  – давление газовой пробы перед газоанализатором (последнее приравнивается к фактическому атмосферному давлению). Значения коэффициента пересчета  $k_i$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента пересчета для реальных газов при нормальных условиях (0 °С; 101,3 кПа)

Вещества	Молярная масса $M_i$ , г	Молярный объем $V_{M_i}$ , л	Коэффициент пересчета $k_i$
NO	30,0061	22,39	$1,34 \cdot 10^{-3}$
NO <sub>2</sub>	46,0055	22,442	$2,05 \cdot 10^{-3}$

2.4 Для корректного сопоставления опытных и расчетных данных полученные массовые или объемные концентрации пересчитываются на *стандартные условия*<sup>1)</sup>, в качестве которых приняты следующие:  $\alpha_{yx} = 1,4$  в сухих дымовых газах при нормальных условиях [ $0^\circ \text{C}$  и  $101,3 \text{ кПа}$  (760 мм рт. ст.)].

В зависимости от применяемых методов измерения и расчетных методик определение содержания газовых компонентов производится *во влажных или сухих продуктах сгорания*. При этом под сухими продуктами сгорания (сухие газы) подразумеваются дымовые газы, в которых произошла конденсация образовавшихся в процессе горения топлива водяных паров из-за их остывания до температур ниже температуры насыщения. Поэтому для пересчета расчетных и опытных концентраций на стандартные условия используются разные формулы:

*при пересчете концентраций  $C$ , полученных для сухих газов, на стандартные условия ( $C^{\text{ст.у}}$ ) для сухих газов:*

$$C_V^{\text{ст.у}} = C_V \cdot \frac{V_{\text{гр}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}{V_{\text{гр}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}; \quad (2.5)$$

$$C_m^{\text{ст.у}} = C_m \cdot \frac{273 + \vartheta_{\text{г}}}{273} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{г}}} \cdot \frac{V_{\text{гр}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}{V_{\text{гр}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}; \quad (2.6)$$

*при пересчете концентраций, полученных для влажных газов, на стандартные условия для сухих газов:*

$$C_V^{\text{ст.у}} = C_V \cdot \frac{V_{\text{г}}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}{V_{\text{гр}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}; \quad (2.7)$$

$$C_m^{\text{ст.у}} = C_m \cdot \frac{273 + \vartheta_{\text{г}}}{273} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{г}}} \cdot \frac{V_{\text{г}}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}{V_{\text{гр}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}, \quad (2.8)$$

где  $\alpha$  – расчетный или опытный коэффициент избытка воздуха в сечении отбора газовой пробы;  $V_{\text{в}}^0$ ,  $V_{\text{г}}^0$  – теоретические объемы соответственно воздуха и влажных газов;  $V_{\text{гр}}^0 = V_{\text{г}}^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0$  – теоретический объем сухих газов.

<sup>1)</sup> ГОСТ Р 50831–95 "Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования".



**2.5 Значения**  $V_a^0$ ,  $V_r^0$ ,  $V_{H_2O}^0$  принимаются по справочным данным или рассчитываются по химическому составу сжигаемого топлива:

для твердого и жидкого топлива ( $m^3/kg$ )

$$V_a^0 = 0,0889(C^r + 0,375S_{op+k}^r) + 0,265H^r - 0,0333O^r ; \quad (2.9)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^r + 0,0124W^r + 0,0161V^0 ; \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} V_r^0 &= V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = \\ &= 1,866 \frac{C^r + 0,375S_{op+k}^r}{100} + 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^r}{100} + V_{H_2O}^0 , \end{aligned} \quad (2.11)$$

где  $C^r$ ,  $S_{op+k}^r$ ,  $H^r$ ,  $O^r$ ,  $N^r$  – соответственно содержание углерода, серы (органической и колчеданной), водорода, кислорода и азота в рабочей массе топлива, % по массе;  $W^r$  – влажность рабочей массы топлива, % по массе;

для газообразного топлива ( $m^3/m^3$ )

$$V^0 = 0,0476 [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2] ; \quad (2.12)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 [H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d_{г.тл}] + 0,0161V^0 ; \quad (2.13)$$

$$V_r^0 = 0,01 [CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n] + 0,79V^0 + \frac{N_2}{100} + V_{H_2O}^0 , \quad (2.14)$$

где  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $C_m H_n$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  – соответственно содержание оксида углерода, диоксида углерода, водорода, сероводорода, углеводородов, азота и кислорода в исходном топливе, % по объему;  $m$  и  $n$  – число атомов углерода и водорода, соответственно;  $d_{г.тл}$  – влагосодержание газообразного топлива,  $г/м^3$ .

Химический состав топлива принимается по паспортным данным или из справочной литературы.

**2.6 Мощность выброса  $M$  (г/с)** – это количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу с уходящими газами в единицу времени (за 1 с). Мощность выброса вредного вещества за определенный период времени (месяц, квартал, год) называется **валовым выбросом** (например, т/год).

**2.7 Удельный массовый выброс  $m$  (г/кг или г/м<sup>3</sup>)** представляет собой количество вредного вещества в граммах, образовавшегося при сжигании 1 кг (или м<sup>3</sup>) топлива:

$$m_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_r . \quad (2.15)$$

Часто этот показатель пересчитывают на единицу массы условного топлива (г/кг усл. топл. или кг/т усл. топл.) и тогда он рассчитывается как:

$$m_i^* = C_i \cdot V_r \cdot (Q_{\text{усл.топл.}} / Q_i^r) , \quad (2.16)$$

где  $Q_{\text{усл.топл}}$  – теплота сгорания условного топлива, равная 29,31 МДж/кг (7000 ккал/кг);  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>).

**2.8 Удельный выброс (по теплу)  $K$  (г/МДж)** – количество вредного вещества в граммах, отнесенного к 1 МДж освобожденной в топке котла химической энергии топлива:

$$K_i = \frac{M_i}{B_p \cdot Q_i^r} , \quad (2.17)$$

где  $B_p$  – расчетный расход топлива (кг/с).

**2.9 Для пересчета указанных параметров** используются следующие соотношения:

$$K_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_r / Q_i^r ; \quad (2.18)$$

$$m_{\text{NO}_2} = K_{\text{NO}_2} \cdot Q_i^r ; \quad (2.19)$$

$$M_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot B_p \cdot V_r ; \quad (2.20)$$

$$M_{\text{NO}_2} = K_{\text{NO}_2} \cdot B_p \cdot Q_i^r ; \quad (2.21)$$

$$M_{\text{NO}_2} = m_{\text{NO}_2} \cdot B_p , \quad (2.22)$$

где  $C_{\text{NO}_2}$  – массовая концентрация  $\text{NO}_2$  при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт. ст.), г/м<sup>3</sup>;  $V_r$  – объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), определяемый следующим образом:

- если концентрация  $C_{\text{NO}_2}$  определена во влажных газах,

$$V_r = V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_b^0 ; \quad (2.23)$$

- если концентрация  $C_{\text{NO}_2}$  определена в сухих продуктах сгорания,

$$V_r = V_{\text{cr}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{a}}^0; \quad (2.24)$$

$$V_{\text{cr}}^0 = V_r^0 - V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \quad (2.26)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха для условий, при которых производилось определение концентрации  $C_{\text{NO}_2}$ .

Удельные выбросы вредных веществ являются основными параметрами, которые контролируют с целью проверки соблюдения утвержденных нормативов выбросов и оценки результатов внедрения природоохранных мероприятий.

### 3 РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

#### 3.1 Исходные данные, необходимые для расчета удельных выбросов:

- $A', W' \text{ и } N'$  – зольность, влажность и содержание азота в топливе, % на рабочую массу.
- $Q_i'$  – теплота сгорания топлива, МДж/кг.
- Тип горелок* – вихревые, прямоточные, с подачей пыли высокой концентрации.
- $V_{\text{daf}}$  – выход летучих на горючую массу, %.
- $\alpha_r$  – коэффициент избытка воздуха в горелках.
- $\alpha_1$  – доля первичного воздуха по отношению к теоретически необходимому.
- $R$  – степень рециркуляции дымовых газов через горелки, %.
- $w_2/w_1$  – отношение скорости вторичного воздуха на выходе из внутреннего канала (ближайшего к первичному) к скорости первичного воздуха.
- $\Delta\alpha_3$  – третичный воздух, подаваемый в топку помимо горелок.
- $\Delta\alpha_{\text{сбp}}$  – сбросной воздух (сушильный агент) при транспорте пыли к горелкам горячим воздухом.
- $T_{\text{ЗАГ}}''$  – температура на выходе из зоны активного горения, К.
- $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/ч.

#### 3.2 Удельные выбросы оксидов азота (в пересчете на $\text{NO}_2$ )

$K_{\text{NO}_2}$  (г/МДж) складываются из топливных  $K_{\text{NO}_2}^{\text{тп}}$  и воздушных  $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$  оксидов азота:

$$K_{\text{NO}_2} = K_{\text{NO}_2}^{\text{пл}} + K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}} . \quad (3.1)$$

3.3 Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{\text{NO}_2}^{\text{пл}} = 0,12 \cdot \xi_{\text{NO}_x} \cdot \beta_{\alpha_{\Gamma}} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{\text{см}} , \quad (3.2)$$

где  $\xi_{\text{NO}_x}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий характеристики топлива

$$\xi_{\text{NO}_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d) . \quad (3.3)$$

Здесь  $FR$  – топливный коэффициент, равный отношению связанного углерода к выходу летучих на рабочую массу:  $FR = C^{\text{св}}/V^r$ , где  $C^{\text{св}} = 100 - W^r - A^r - V^r$ ; а  $N^d$  – содержание азота в сухой массе топлива, %.

Значения других коэффициентов из формулы (3.2) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов

Фактор, который учитывается коэффициентом	Зависимость	Диапазон пригодности зависимости
Влияние коэффициента избытка воздуха в вихревой горелке $\beta_{\alpha_{\Gamma}}^{\text{вхр}}$	$(0,35 \cdot \alpha_{\Gamma} + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_{\Gamma} \leq 1,3$
Влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha_{\Gamma}}^{\text{прм}}$	$(0,53 \cdot \alpha_{\Gamma} + 0,12)^2$	$0,9 \leq \alpha_{\Gamma} \leq 1,3$
Влияние доли первичного воздуха в горелке $\beta_{\alpha_1}$	$1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$	$0,15 \leq \alpha_1 \leq 0,55$
Влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух (без учета снижения температуры в зоне активного горения) $\beta_R$	$1 - 0,016 \sqrt{R}$	$(0 \leq R \leq 30) \%$
Влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота $\beta_{\vartheta}$	$0,11 \cdot \sqrt[3]{T_{3\text{AG}}^{\text{н}} - 1100}$	$1250 \text{ K} \leq T_{3\text{AG}}^{\text{н}} \leq 2050 \text{ K}$
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\beta_{\text{см}}^{\text{вхр}}$	$0,4 \cdot (w_2/w_1)^2 + 0,32$	$1,0 \leq w_2/w_1 \leq 1,6$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\beta_{\text{см}}^{\text{прм}}$	$0,98 \cdot w_2/w_1 - 0,47$	$1,4 \leq w_2/w_1 \leq 4,0$

3.4 При подаче в горелки пыли высокой концентрации значение  $K_{\text{NO}_2}^{\text{пл}}$ , подсчитанное по формуле (3.2), умножают на коэффициент 0,8. При этом долю первичного воздуха  $\alpha_1$  и отношение  $w_2/w_1$  принимают равными тем значениям, которые были бы выбраны при обычной подаче пыли к горелкам первичным воздухом.

3.5 Воздушные оксиды азота образуются в зоне максимальных температур, то есть там, где поля концентраций, скоростей и температур отдельных горелок уже выровнялись. Следовательно,  $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$  определяется в основном не особенностями горелок, а интегральными параметрами топочного процесса.

Для подсчета  $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$  используют зависимость, учитывающую известное уравнение Зельдовича:

$$K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}} = \frac{1,54 \cdot 10^{16}}{\sqrt{T_{3\text{AG}}^*}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{3\text{AG}}^* - 1}{\alpha_{3\text{AG}}^*}} \cdot \exp\left(-\frac{67000}{T_{3\text{AG}}^*}\right), \quad (3.4)$$

где  $\alpha_{3\text{AG}}^*$  — коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения, условно принимаемый как сумма организованно подаваемого воздуха через горелки и присосов через нижнюю часть топочной камеры, т.е.

$$\alpha_{3\text{AG}}^* = \alpha_{\Gamma} + 1/2 \Delta \alpha_{\Gamma}; \quad (3.5)$$

$T_{3\text{AG}}^*$  — температура на выходе из зоны активного горения, К.

Уравнение (3.4) справедливо в диапазоне коэффициентов избытка воздуха  $1,05 \leq \alpha_{3\text{AG}}^* \leq 1,4$  и до температуры  $T_{3\text{AG}}^* = 2050$  К. При  $T_{3\text{AG}}^* < 1800$  К значением  $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$  можно пренебречь.

Температуру на выходе из зоны активного горения  $T_{3\text{AG}}^*$  рассчитывают в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

Для случая, когда рециркуляция дымовых газов через горелки отсутствует, температура на выходе из зоны активного горения  $\vartheta_{3\text{AG}}^*$ , °С, рассчитывается так:

$$\vartheta_{3\text{AG}}^* = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{\text{сг}}^{3\text{AG}} \cdot Q_{\Gamma}^* + Q_{\text{в}} + i_{\text{пл}}}{(V_{\text{с}})_{\Gamma}} - \frac{2,05 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_{\Gamma} \cdot (T_{3\text{AG}}^*)^4 \psi F}{B_{\text{р}} \cdot (V_{\text{с}})_{\Gamma}}, \quad (3.6)$$

где  $Q_{\text{в}}$  — теплосодержание воздуха, поступающего через горелки, МДж/кг;  $(V_{\text{с}})_{\Gamma}$  — средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания

1 кг топлива, МДж/(кг·°С);  $\beta_{\text{сг}}^{\text{ЗАГ}}$  – степень выгорания топлива в зоне активного горения;  $i_{\text{тл}}$  – энтальпия топлива, МДж/кг;  $\psi F$  – произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону активного горения, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{\text{Г}}$  – степень черноты топки в зоне максимального тепловыделения.

Приведенное уравнение решается методом последовательных приближений, т.к. в его правую часть входит  $T_{\text{ЗАГ}}'' = \vartheta_{\text{ЗАГ}}'' + 273$ . Если расчетное значение  $\vartheta_{\text{ЗАГ}}''$  по формуле (3.6) будет более чем на 50 °С отличаться от предварительно выбранной величины  $T_{\text{ЗАГ}}''(\vartheta_{\text{ЗАГ}}'')$ , то необходимо сделать второе приближение.

При наличии рециркуляции дымовых газов расчет  $\vartheta_{\text{ЗАГ}}''$  следует выполнять в соответствии с проектированием топок с твердым шлакоудалением.

Определение концентраций и массовых выбросов оксидов азота производится по формулам, приведенным в разделе 2 настоящих Методических указаний.

Примеры расчетов выбросов оксидов азота в котлах разных типов при сжигании различных видов твердого топлива приведены в приложении 1 к настоящим Методическим указаниям. Для некоторых котлов показано влияние подсветки факела газом или мазутом (см. раздел 5 настоящих Методических указаний).

#### 4 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА И МАЗУТА

Настоящие Методические указания позволяют рассчитывать концентрации оксидов азота при различных способах сжигания газа и мазута в котлах в следующих диапазонах изменения основных режимных параметров:

нагрузка котла, $D/D_{\text{ном}}$ .....	0,5–1,0;
коэффициент избытка воздуха в зоне	
активного горения (ЗАГ) $\alpha_{\text{ЗАГ}}$ .....	0,7–1,4;
доля газов рециркуляции, подаваемых в ЗАГ, $R$ .....	0–0,35;
доля влаги, вносимой в ЗАГ, $g$ .....	0–0,35;
доля воздуха, вводимого во вторую ступень	
горения при ступенчатом сжигании, $\delta$ .....	0–0,33.

Пример расчета концентрации оксидов азота в дымовых газах котла ТГМП-204ХЛ при сжигании природного газа приведен в приложении 2 к настоящим Методическим указаниям.

## 4.1 Исходные данные, необходимые для расчета:

### *а) конструктивные параметры*

$a_T$	– ширина топки (в свету), м; при наличии двусветного экрана принимается ширина одной ячейки;
$b_T$	– глубина топки (в свету), м;
$h_{ар}$	– расстояние между осями соседних (по высоте) горелок, м; при неравенстве расстояний между ярусами (при $Z_{ар} \geq 3$ ) определяются расстояния между первым и вторым ярусами горелок $h_{1,2}$ , вторым и третьим $h_{2,3}$ и т.д.;
$h_{\delta}$	– расстояние между осью верхнего яруса и осью сопел вторичного дутья (в случае двухступенчатого сжигания топлива);
<i>тип горелок</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• унифицированные и оптимизированные;</li> <li>• двухпоточные стадийного сжигания;</li> <li>• многопоточные стадийного сжигания;</li> <li>• многопоточные стадийного сжигания с подачей части топлива в инертные газы;</li> </ul>
$D_a$	– диаметр амбразуры горелок, м;
$n_T$	– количество горелок;
$d_s$	– диаметр экранных труб поверхностей нагрева в топке, мм;
$s$	– шаг экранных труб, мм;
$Z_3$	– число двусветных экранов.

### *б) характеристики топлива*

$Q_i^r$	– теплотворная способность топлива, МДж/кг (МДж/м <sup>3</sup> );
$N^r$	– содержание азота в топливе на рабочую массу %;
$V_B^0$	– теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при $\alpha = 1,0$ , м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> );
$V_r^0$	– объем продуктов сгорания, образовавшихся при стехиометрическом ( $\alpha = 1,0$ ) сжигании топлива, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> );
$V_{RO_2}$	– объем трехатомных газов, полученных при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> );
$V_{N_2}^0$	– теоретический объем азота, полученный при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м <sup>3</sup> /кг (м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> );

### *в) режимные параметры*

$B_p$	– расчетный расход топлива, кг/с (м <sup>3</sup> /с); при наличии двусветного экрана $B_p$ принимается на одну ячейку;
$t_{тл}$	– температура топлива (при сжигании мазута), °С;
$g_{\phi}$	– удельный расход форсуночного пара, идущего на распыл мазута, кг пара / кг мазута;
$t_{\phi}$	– температура пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, °С;
$p_{\phi}$	– давление пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, МПа;

$t_{гв}$	– температура горячего воздуха, °С;
$\alpha_T^*$	– коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;
$\Delta\alpha_T$	– присосы холодного воздуха в топку;
$R$	– доля рециркуляции дымовых газов в зону активного горения (0–0,35);
$t_{гп}$	– температура газов в месте отбора на рециркуляцию, °С;
$g$	– водотопливное отношение в долях ( $g = G_{вл}/G_{тпл} = 0–0,35$ );
$t_{вл}$	– температура воды (или пара), подаваемой в ЗАГ, °С;
$p_{вл}$	– давление воды (или пара), подаваемой в ЗАГ, МПа;
$\delta$	– доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения при двухступенчатом сжигании (0–0,35).

**4.2 Массовая концентрация оксидов азота (в пересчете на NO<sub>2</sub>) во влажных продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха в зоне активного горения (г/м<sup>3</sup>) для нормальных условий (0 °С, 101,3 кПа или 760 мм рт. ст.) определяется по формулам:**

*при сжигании газа:*

$$NO_2^г = 2,05 \cdot 10^{-3} K_{\Gamma} \left[ 26,0 \cdot \exp \left( 0,26 \cdot \frac{\bar{T}_{ЗАГ} - 1700}{100} \right) - 4,7 \right] \times \\ \times \left[ \exp(q_{ЗАГ}^{отр}) - 1 \right] \times \left[ 13,0 - 79,8 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,07)^4 + 18,1 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,07)^3 + \right. \\ \left. + 59,4 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,07)^2 + 9,6 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,07) \right] \cdot \tau_{ЗАГ}; \quad (4.1)$$

*при сжигании мазута:*

$$NO_2^м = 2,05 \cdot 10^{-3} K_{\Gamma} \left\{ \left[ 24,3 \cdot \exp \left( 0,19 \cdot \frac{\bar{T}_{ЗАГ} - 1650}{100} \right) - 12,3 \right] \times \right. \\ \times \left[ \exp(q_{ЗАГ}^{отр}) - 1 \right] \times \left[ 15,1 - 131,7 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,09)^4 + 72,3 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,09)^3 + \right. \\ \left. + 73,0 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,09)^2 + 2,8 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1,09) \right] \cdot \tau_{ЗАГ} + \Delta NO_2^{пл} \left. \right\}, \quad (4.2)$$

где  $\bar{T}_{ЗАГ}$  – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения, К;  $q_{ЗАГ}^{отр}$  – отраженный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{ЗАГ}$  – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения;  $\tau_{ЗАГ}$  – время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения, с;  $K_{\Gamma}$  – коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, определяемый по таблице 4.1;  $\Delta NO_2^{пл}$  – член, учитывающий количество топливных оксидов азота при превышении содержания азота в составе мазута 0,3 %, рассчитываемый как:



$$\Delta \text{NO}_2^{\text{пл}} = \frac{650 \cdot (N^r - 0,3)}{V_r}, \quad (4.3)$$

где  $V_r$  – объем продуктов сгорания в ЗАГ, определяемый согласно пп. 4.19, 4.20 данной методики.

Таблица 4.1 – Значения коэффициента  $K_r$  в зависимости от конструкции горелочного устройства

Место ввода газов рециркуляции	Топливо	
	Газ	Мазут
Унифицированные и оптимизированные	1,0	1,0
Двухпоточные горелки стадийного сжигания	0,75	0,8
Многopotочные горелки стадийного сжигания	0,65	0,7
Многopotочные горелки стадийного сжигания с подачей части топлива в инертные газы	0,5	0,6

**4.3 Среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения (ЗАГ):**

$$\bar{T}_{\text{ЗАГ}} = T_{\text{ад}} \cdot (1 - \psi_{\text{ЗАГ}})^{0,25}, \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{ад}}$  – адиабатная температура горения топлива, К;  $\psi_{\text{ЗАГ}}$  – средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ.

**4.4 Адиабатная температура горения (К) рассчитывается методом последовательных приближений:**

$$T_{\text{ад}} = \left[ \beta_{\text{сг}} \cdot Q_i^r + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{ф}} + \alpha_r \cdot I_{\text{в}}^0 + \Delta \alpha_r \cdot I_{\text{хв}} + K_R \cdot R \cdot I_{\text{rp}} + g \cdot (i_{\text{вл}} - r) \right] / \left[ \beta_{\text{сг}} \cdot V_{\text{сг}}^0 \cdot c_r + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{ЗАГ}} - \beta_{\text{сг}}) V_{\text{в}}^0 \cdot c_{\text{в}} + 1,24 \cdot g \cdot c_{\text{вл}} + K_R \cdot R \cdot (V_{\text{г}}^0 \cdot c_r + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{отб}} - 1) V_{\text{в}}^0 \cdot c_{\text{в}} + 1,24 \cdot g \cdot c_{\text{вл}}) \right] + 273, \quad (4.5)$$

где  $\beta_{\text{сг}}$  – степень выгорания топлива в ЗАГ, определяемая по таблице 4.2 в зависимости от вида сжигаемого топлива;  $Q_i^r$  – теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>);  $K_R$  – коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3;  $V_{\text{в}}^0$  и  $V_{\text{г}}^0$  – соответственно теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  $\alpha_{\text{отб}}$  – коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газотока на рециркуляцию.

Таблица 4.2 – Зависимость степени выгорания топлива  $\beta_{\text{сг}}$  от коэффициента избытка воздуха в ЗАГ

Топливо	$\alpha_{\text{ЗАГ}}$												
	0,7	0,8	0,9	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	$\geq 1,09$
Газ	0,609	0,696	0,783	0,87	0,88	0,9	0,915	0,93	0,95	0,965	0,98	0,98	0,98
Мазут	0,588	0,672	0,756	0,84	0,85	0,87	0,88	0,9	0,915	0,93	0,95	0,965	0,98

Таблица 4.3 – Значения коэффициента  $K_R$  в зависимости от способа ввода газов рециркуляции в ЗАГ

Способ ввода газов рециркуляции	$K_R$
В под топки	0,05
В шлицы под горелки	0,15
Снаружи воздушного потока горелки	0,85
В дутьевой воздух	1,0
Между воздушными потоками горелки	1,2

4.5 Теплота, вносимая в зону активного горения с топливом (учитывается при сжигании мазута, при сжигании газа принимается  $Q_{\text{тл}} = 0$ ), МДж/кг:

$$Q_{\text{тл}} = c_{\text{тл}} \cdot t_{\text{тл}} \quad (4.6)$$

Теплоемкость мазута, МДж/(кг·°С)

$$c_{\text{тл}} = (1,74 + 0,0025 \cdot t_{\text{тл}}) \cdot 10^{-3}, \quad (4.7)$$

где  $t_{\text{тл}}$  – температура мазута, °С.

4.6 Тепло, вносимое в зону активного горения паровым дутьем через форсунку (при сжигании жидкого топлива), МДж/кг:

$$Q_{\phi} = g_{\phi} \cdot i_{\phi}, \quad (4.8)$$

где  $g_{\phi}$  – удельный расход пара через форсунку на 1 кг мазута, кг/кг;  $i_{\phi}$  – энтальпия пара, подаваемого на распыл, МДж/кг.

Параметры пара, поступающего на распыл мазута, обычно составляют  $p_{\phi} = 0,3\text{--}0,6$  МПа,  $t_{\phi} = 280\text{--}350$  °С,  $g_{\phi}$  при номинальной нагрузке равен  $0,03\pm 0,05$  кг/кг мазута.

4.7 Теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/кг (МДж/м³):

$$Q_{\text{в}} = \alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{в}}^0 + 0,5 \cdot \Delta \alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{хв}}^0, \quad (4.9)$$

где  $\alpha_T = \alpha_T^* - \Delta\alpha_T$  – избыток воздуха в горелке при наличии присосов воздуха в топку;  $I_B^0$  и  $I_{хв}^0$  – энтальпии теоретически необходимого количества воздуха при температуре горячего и холодного воздуха, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>).

**4.8 Теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>)**

$$Q_{гр} = K_R \cdot R \cdot I_{гр} . \quad (4.10)$$

Здесь  $K_R$  – коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3;  $R$  – доля рециркуляции дымовых газов;  $I_{гр}$  – энтальпия газов рециркуляции, подаваемых в ЗАГ, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>), вычисляемая как:

$$I_{гр} = I_{гр}^0 + (\alpha_{отб} - 1) \cdot I_B^0 , \quad (4.11)$$

где  $\alpha_{отб}$  – коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода на рециркуляцию (обычно  $\alpha_{отб} = \alpha_{вэп}^*$ );  $I_{гр}^0$  и  $I_B^0$  – соответственно энтальпии газов рециркуляции и теоретически необходимого количества воздуха при температуре газов рециркуляции (МДж/м<sup>3</sup>), рассчитываемые в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

**4.9 Теплота, вносимая в зону активного горения при подаче воды или пара, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>),**

$$Q_{вл} = g \cdot (i_{вл} - r) , \quad (4.12)$$

где  $g$  – водотопливное отношение, определяемое в зависимости от вида сжигаемого топлива:

$$g = \begin{cases} \frac{G_{вл}}{G_{маз}} \left( \frac{\text{кг влаги}}{\text{кг мазута}} \right) & \text{– если топливо мазут;} \\ \frac{G_{вл}}{G_{газ}} \cdot \rho_{газ}^0 \left( \frac{\text{кг влаги}}{\text{м}^3 \text{ газа}} \right) & \text{– если топливо природный газ,} \end{cases} \quad (4.13)$$

$G_{вл}$ ,  $G_{маз}$ ,  $G_{газ}$  – соответственно расход влаги, мазута и газа, кг/с;  $\rho_{газ}^0$  – плотность сухого природного газа при 0 °С и 101,3 кПа (760 мм рт. ст.);  $i_{вл}$  – энтальпия влаги (воды или пара), поступающей в зону активного горения, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>);  $r$  – теплота парообразования (при подаче воды в зону активного горения  $r = 2,512$  МДж/кг; при подаче пара  $r = 0$ ).

**4.10 Избыток воздуха в зоне активного горения  $\alpha_{ЗАГ}$ :**

$$\alpha_{ЗАГ} = \alpha_T + 0,5 \cdot \Delta\alpha_T . \quad (4.14)$$

#### 4.11 Средняя теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(м<sup>3</sup>·°C):

при сжигании природного газа

$$c_r = (1,57 + 0,134 \cdot k_r) \cdot 10^{-3}; \quad (4.15)$$

при сжигании мазута

$$c_r = (1,58 + 0,122 \cdot k_r) \cdot 10^{-3}, \quad (4.16)$$

где  $k_r = (\vartheta_{ад} - 1200)/1000$  – температурный коэффициент изменения теплоемкости;  $\vartheta_{ад}$  – ожидаемая адиабатная температура, °C.

#### 4.12 Теплоемкость воздуха при высоких температурах, МДж/(м<sup>3</sup>·°C)

$$c_a = (1,46 + 0,092 \cdot k_a) \cdot 10^{-3}, \quad (4.17)$$

где  $k_a = (\vartheta_{ад} - 1200)/1000$  – температурный коэффициент изменения теплоемкости.

#### 4.13 Теплоемкость водяных паров, МДж/(м<sup>3</sup>·°C)

$$c_{вл} = 4,1868 \cdot (0,356 - 0,769 \cdot 10^{-11} \cdot \vartheta_{ад}^3 + 0,245 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_{ад}^2 + 0,386 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_{ад}) \cdot 10^{-3}. \quad (4.18)$$

#### 4.14 Средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ, $\psi_{ЗАГ}$ :

$$\psi_{ЗАГ} = \frac{\sum (\psi_i \cdot F_{ст_i}) + \psi' \cdot F_{верх} + \psi'' \cdot F_{ниж}}{F_{ст} + F_{верх} + F_{ниж}}, \quad (4.19)$$

где  $F_{ст}$ ,  $F_{верх}$ ,  $F_{ниж}$  – соответственно полная поверхность экранированных стен ЗАГ (рисунок 4.1), площадь поперечного сечения топки, ограничивающего ЗАГ сверху и снизу, м<sup>2</sup>;  $F_{ст_i}$ ,  $\psi_i$  – соответственно площадь участка стены ЗАГ, м<sup>2</sup>, и тепловая эффективность этого участка;  $\psi'$  – коэффициент, характеризующий отдачу теплоты излучением в вышерасположенную зону:

- для топок, работающих на газе,  $\psi' = 0,1$ ;
- для топок, работающих на мазуте,  $\psi' = 0,2$ .

Коэффициент  $\psi''$  характеризует отдачу теплоты в сторону пода топки:

- если под не включен в объем ЗАГ:

$$\psi'' = \frac{F_{\phi}^H \cdot \psi_{\phi} + 2 \cdot F_6^H \cdot \psi_6 + F_3^H \cdot \psi_3 + F_n \cdot \psi_n}{F_{\phi}^H + 2 \cdot F_6^H + F_3^H + F_n}, \quad (4.20)$$

где  $F_{\phi}^H$ ,  $F_6^H$ ,  $F_3^H$ ,  $F_n$  – соответственно площади фронтного, боковых, и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода, м<sup>2</sup> (см. схемы на рисунке 4.1);  $\psi_{\phi}$ ,  $\psi_6$ ,  $\psi_3$ ,  $\psi_n$  – соответственно тепловая эффективность

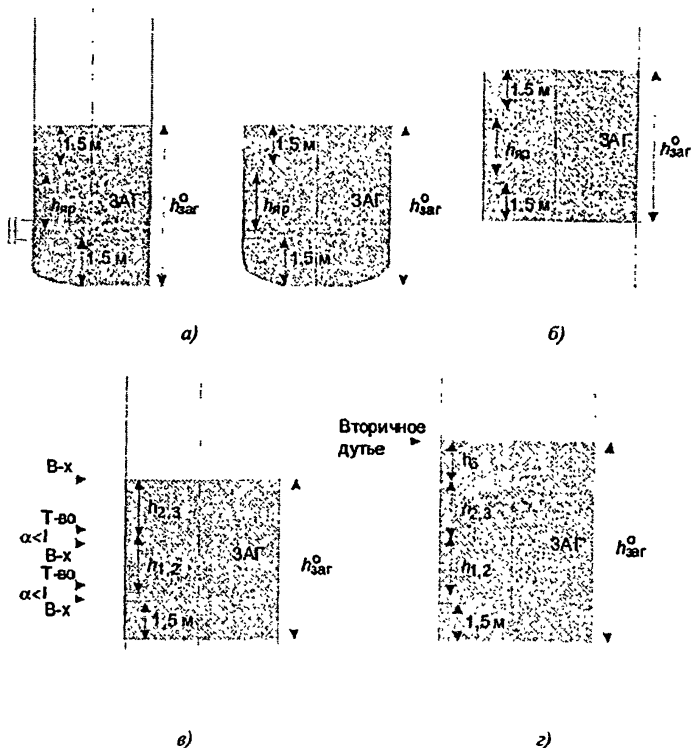
фронтального, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода;

- если под включен в объем ЗАГ:

$$\psi^* = \psi_n. \quad (4.21)$$

4.15 Отраженный поток в зоне активного горения  $q_{ЗАГ}^{отр}$ , МВт/м<sup>2</sup>,

$$q_{ЗАГ}^{отр} = q_{ЗАГ} \cdot (1 - \psi_{ЗАГ}). \quad (4.22)$$



а, б, в и г – варианты ввода топлива и воздуха в топку.

Рис. 4.1 – Схемы определения зоны активного горения

#### 4.16 Теплонапряжение зоны активного горения, МВт/м<sup>2</sup>,

$$q_{3AG} = \frac{B_p \cdot (\beta_{сг} \cdot Q_f' + Q_{тл} + Q_{ф} + Q_{в} + Q_{гр} + Q_{ал})}{f_{3AG}}, \quad (4.23)$$

где  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с (м<sup>3</sup>/с), (при наличии в топке двухсветного экрана  $B_p$  принимается на одну ячейку).

#### 4.17 Полная поверхность зоны активного горения, м<sup>2</sup>,

$$f_{3AG} = 2 \cdot a_T \cdot b_T + 2 \cdot (a_T + b_T) \cdot h_{3AG}, \quad (4.24)$$

где  $a_T$ ,  $b_T$  – соответственно ширина фронта и глубина топочной камеры, м, [при наличии в топке двухсветных экранов принимается ширина одной ячейки  $a_T^2 = a_T / (Z_s + 1)$ ,  $Z_s$  – число двухсветных экранов].

#### 4.18 Высота зоны активного горения $h_{3AG}$ , м,

$$h_{3AG} = h_{3AG}^0 \frac{V_r^{R,g}}{V_r}, \quad (4.25)$$

где  $h_{3AG}^0$  – высота зоны активного горения без учета ввода в нее газов рециркуляции и влаги, м;  $V_r$  – объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м<sup>3</sup> газообразного) топлива в ЗАГ, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  $V_r^{R,g}$  – объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м<sup>3</sup> газообразного) топлива при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

*При настенной компоновке* горелок высота  $h_{3AG}^0$  определяется из геометрических характеристик топки (см. схемы на рисунке 4.1):

- *при обычном сжигании*

$$h_{3AG}^0 = \sum_{i=1}^n h_{яp_i} + D_a + 3; \quad (4.26a)$$

- *при ступенчатом сжигании*

$$h_{3AG}^0 = \sum_{i=1}^n h_{яp_i} + h_{\delta} + 0,5 \cdot D_a + 1,5, \quad (4.26б)$$

где  $h_{яp_i}$  – расстояние между осями горелок по высоте между ярусами, м;  $n$  – количество ярусов;  $h_{\delta}$  – расстояние между осями горелок верхнего яруса и сопел вторичного дутья, м;  $D_a$  – диаметр амбразуры горелок, м.

*При подовой компоновке* горелок единичной мощностью от 50 до 95 МВт  $h_{3AG}^0 = 7,5$  м, а горелок мощностью от 96 до 160 МВт  $h_{3AG}^0 = 10$  м. При двухступенчатом сжигании  $h_{3AG}^0$  принимается равной расстоянию между подом и осями сопел вторичного дутья.

**4.19 Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м<sup>3</sup> газообразного) топлива в ЗАГ,  $V_r$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):**

$$V_r = \beta_{cr} \cdot V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{cr}) \cdot V_{\text{в}}^0. \quad (4.27)$$

**4.20 Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м<sup>3</sup> газообразного) топлива в случае ввода в ЗАГ газов рециркуляции и/или влаги,  $V_r^{R,g}$ , м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):**

$$V_r^{R,g} = \beta_{cr} \cdot V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{cr}) \cdot V_{\text{в}}^0 + 1,24 \cdot g + K_R \cdot R \cdot [V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{отб} - 1) \cdot V_{\text{в}}^0 + 1,24 \cdot g]. \quad (4.28)$$

**4.21 Время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения  $\tau_{ЗАГ}$  (с) определяется как**

$$\tau_{ЗАГ} = \frac{a_T \cdot b_T \cdot h_{ЗАГ}}{B_p \cdot V_r^{R,g} \cdot \left( \frac{T_{ЗАГ}}{273} \right)} \cdot \xi, \quad (4.29)$$

где  $\xi$  – коэффициент заполнения топочной камеры восходящими потоками газов:

- при фронтальном расположении горелок  $\xi = 0,75$ ;
- при встречном расположении горелок  $\xi = 0,8$ ;
- при подовой компоновке  $\xi = 0,9$ .

**4.22 Пересчет массовой концентрации оксидов азота (см. п. 4.2) на стандартные условия (сухие продукты сгорания и  $\alpha = 1,4$ ), г/м<sup>3</sup>:**

$$\text{NO}_2^{\text{ст.у}} = \text{NO}_2^{\text{м}} \cdot \frac{V_r^{R,g}}{[V_{cr}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0] \cdot (1 + R)}. \quad (4.30)$$

## **5 РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ С МАЗУТОМ ИЛИ ГАЗОМ**

**5.1 При проектировании новых котлов, рассчитанных на сжигание угля и природного газа или угля и мазута, расчет выбросов оксидов азота должен выполняться для случая работы котла с номинальной нагрузкой полностью на худшем в экологическом отношении топливе. Приведенное содержание азота на 1 ГДж у всех марок углей выше, чем у мазута, а у природного газа связанный азот вообще отсутствует. Следовательно, для котлов, которые проектируются на несколько видов топлива, включая уголь, расчет выбросов оксидов азота следует выполнять по формулам раздела 3 настоящих Методических указаний.**

**5.2 В действующих котлах, в которых в ряде случаев сжигаются одновременно уголь и мазут или уголь и газ, расчет массовой концентрации оксидов азота  $C_{\text{NO}_2}$  (г/м<sup>3</sup>) проводится для твердого топлива в соответствии с разделом 3 настоящих Методических указаний, а затем значение полученной концентрации  $C_{\text{NO}_2}$  нужно умножить на поправочный безразмерный коэффициент  $A$ , который определяется по следующим формулам:**

- при сжигании газа вместе с углем:

$$A_{\text{г}} = 1 - \sqrt{\delta_{\text{г}}/2,5} ; \quad (5.1)$$

- при сжигании мазута вместе с углем:

$$A_{\text{м}} = 1 - \sqrt{\delta_{\text{м}}/1,65} , \quad (5.2)$$

где  $\delta_{\text{г}}$  и  $\delta_{\text{м}}$  – доли газа или мазута по теплу.

**5.2.1 Доли газа и мазута по теплу** рассчитывают по формуле

$$\delta_i = \frac{B_{\text{p}_i} (Q_i^{\text{г}})_i}{B_{\text{p}_y} (Q_i^{\text{г}})_y + B_{\text{p}_i} (Q_i^{\text{г}})_i} , \quad (5.3)$$

где  $B_{\text{p}_i}$  – расчетный расход газа или мазута, м<sup>3</sup>/с (кг/с);  $(Q_i^{\text{г}})_i$  – теплота сгорания газа или мазута, МДж/м<sup>3</sup> (МДж/кг);  $B_{\text{p}_y}$  и  $(Q_i^{\text{г}})_y$  – то же, для угля, кг/с и МДж/кг.

**5.2.2 Определения удельных выбросов  $K_{\text{NO}_2}$  (г/МДж)** производятся по уравнению (2.20), в правую часть которого подставляется полученная величина  $C_{\text{NO}_2}$  [с поправкой по уравнению (5.1) или (5.2)].

**5.2.3 Объем сухих дымовых газов и теплоту сгорания при сжигании угля с мазутом** рассчитывают по формулам:

$$(V_{\text{сг}})_{\text{см}} = \delta_{\text{м}} (V_{\text{сг}})_{\text{м}} + (1 - \delta_{\text{м}}) (V_{\text{сг}})_{\text{г}} ; \quad (5.4)$$

$$(Q_i^{\text{г}})_{\text{см}} = \delta_{\text{м}} (Q_i^{\text{г}})_{\text{м}} + (1 - \delta_{\text{м}}) (Q_i^{\text{г}})_{\text{г}} , \quad (5.5)$$

где  $\delta_{\text{м}}$  – доля мазута по теплоте, определяемая по (5.3);  $(V_{\text{сг}})_{\text{м}}$  – объем сухих дымовых газов (м<sup>3</sup>/кг), образующихся при полном сгорании мазута при  $\alpha = 1,4$  (см. раздел 2);  $(Q_i^{\text{г}})_{\text{м}}$  – теплота сгорания мазута (МДж/кг).

**5.2.4 При сжигании угля совместно с газом** расчет выполняется условно на 1 кг твердого топлива с учетом количества газа, приходящегося на 1 кг угля:

$$(V_{\text{сг}})_{\text{см}} = (V_{\text{сг}})_{\text{г}} + x (V_{\text{сг}})_{\text{г}} ; \quad (5.6)$$



$$(Q_i')_{\text{см}} = (Q_i')_y + x (Q_i')_r, \quad (5.7)$$

где  $x$  – количество газа на 1 кг твердого топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

Если смесь топлив задана долями тепловыделения каждого топлива ( $\delta_y$  и  $\delta_r$ ), то количество газа  $x$ , приходящееся на 1 кг твердого топлива, рассчитывается как

$$x = \frac{\delta_r}{\delta_y} \cdot \frac{(Q_i')_y}{(Q_i')_r} \quad (5.8)$$

**Приложение 1**  
К методическим указаниям  
по расчету выбросов оксидов азота  
с дымовыми газами котлов  
тепловых электростанций

**ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ  
ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ**

Параметр	Формула или обоснование	Пылеугольные котлы							
		БКЗ-500-140-1	БКЗ-210 до реконстр.	БКЗ-210 после реконстр.	БКЗ-420-140/5	ТП-87	ТП-87	ТПП-215	ТПП-210
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Марка угля	Техзадание или эксплуатационные данные	Березовский 2Б	Промпродукт кузнецких каменных углей ГР		Экибастузский СС	Кузнецкий 1СС	Кузнецкий Т	Нерюн-гринский ЗСС	Донецкий АШ
Зольность $A^r$ , %	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)»; Табл. I – С-Пб, 1998	4,7	28,7	28,7	45,6	14,8	20,3	19,8	34,8
Влажность $W^r$ , %		33,0	13,0	13,0	5,0	10,5	9,7	10,0	8,5
Содержание азота $N^r$ , %		0,4	1,8	1,8	0,8	1,5	1,5	0,6	0,5
Выход летучих $V^{def}$ , %		48,0	41,5	41,5	25	33,5	14	20	4
Теплота сгорания $Q_f^r$ , МДж/кг		15,66	18,09	18,09	14,61	23,11	22,06	22,48	18,23
Содержание азота на сухую массу $N^d$ , %	$\frac{100 \cdot N^r}{(100 - W^r)}$	0,60	2,07	2,07	0,84	1,68	1,66	0,67	0,55

Выход летучих на рабочую массу $V^r$ , %	$(100 W^r - A^r)/100$	29,9	24,2	24,2	12,4	25,0	9,8	14,0	2,3
Содержание связанного углерода $C^{св}$	$100 - W^r - A^r - V^r$	32,4	34,1	34,1	37,1	49,7	60,2	56,2	54,4
Топливный коэффициент $FR$	$C^{св}/V^r$	1,08	1,41	1,41	3,00	1,99	6,14	4,00	24,00
Влияние характеристик топлива на оксиды азота $\xi_{NO_x}$	$FR^{0,6} + (1 + N^d)$	2,65	4,30	4,30	3,78	4,18	5,63	3,96	8,28
Тип горелок	Описание котла	Прямоточные	Прямоточные	Прямоточные	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые/прямоточные
Коэффициент избытка воздуха в горелках $\alpha_r$	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)» или эксплуатационные данные	1,1	1,12	0,95	1,2	1,1	1,1	1,1	$\frac{1,0}{0,87}$
Доля первичного воздуха $\alpha_1$	То же	0,14	0,24	0,24	0,3	0,3	0,2	0,3	$\frac{0,15}{0,15}$

## Продолжение приложения 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Степень рециркуляции дымовых газов через горелки $R, \%$	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)» или эксплуатационные данные	40	4	4	0	0	0	0	$\frac{0}{0}$
Температура за зоной активного горения $T_{\text{заг}}^*, \text{K}$	Руководящие указания «Проектирование топок с твердым шлакоудалением»	1580	1700	1700	1830	1960	1980	1821	$\frac{1848}{1773}$
Соотношение скоростей в выходном сечении горелок $w_2/w_1$	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)» или эксплуатационные данные	2	2	1,8	1,48	1,4	1,4	1,4	$\frac{1,6}{2}$
Присосы в топку $\Delta\alpha_T$	То же	0,1	0,1	0,1	0,02	0,1	0,1	0,02	0,1
Третьичное дутье $\alpha_{\text{III}}$	Описание котла	0	0	0,17	0	0	0	0	$\frac{0,1}{0,23}$
Коэффициент избытка воздуха на выходе из зоны активного горения $\alpha_{\text{заг}}^*$	$\alpha_T + 0,5 \cdot \Delta\alpha_T$	1,15	1,17	1,00	1,21	1,15	1,15	1,11	$\frac{1,05}{0,92}$

Влияние $\alpha_T$ на образование топливных оксидов азота $\beta_{\alpha_T}$	Для вихревой горелки $(0,35 \cdot \alpha_T + 0,4)^2$ , для прямоточной горелки $(0,53 \cdot \alpha_T + 0,12)^2$	0,494	0,509	0,389	0,672	0,616	0,616	0,616	$\frac{0,563}{0,338}$
Влияние $\alpha_1$ на образование топливных оксидов азота $\beta_{\alpha_1}$	$1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$	0,722	0,895	0,895	0,999	0,999	0,826	0,999	$\frac{0,740}{0,740}$
Влияние $R$ на образование топливных оксидов азота $\beta_R$	$1 - 0,016 \cdot R^{0,5}$	0,930	0,972	0,972	1,00	1,00	1,00	1,00	$\frac{1,00}{1,00}$
Влияние $T_{3AG}^*$ на образование топливных оксидов азота $\beta_{T_{3AG}^*}$	$0,11 \cdot (T_{3AG}^* - 1100)^{0,33}$	0,861	0,928	0,928	0,990	1,046	1,054	0,986	$\frac{0,998}{0,964}$
Влияние смещения в корне факела на образование топливных оксидов азота $\beta_{см}$	Для вихревой горелки $0,4 \cdot (w_2/w_1)^2 + 0,32$ , для прямоточной – $0,98 \cdot w_2/w_1 - 0,47$	1,49	1,49	1,29	1,20	1,10	1,10	1,10	$\frac{1,34}{1,49}$

## Окончание приложения 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удельный выброс топливных оксидов азота $K_{NO_2}^{тпл}$ , г/МДж	$0,12 \cdot \xi_{NO_2} \cdot \beta_{aT} \cdot \beta_{a1} \cdot \beta_R \times$ $\times \beta_{T_{3aT}^*} \cdot \beta_{cm}$	0,135	0,316	0,209	0,360	0,357	0,400	0,319	$\frac{0,554}{0,356}$
Удельный выброс воздушных оксидов азота $K_{NO_2}^{взд}$ , г/МДж	$1,54 \cdot 10^{16} \cdot [(\alpha_{3aT}^* - 1) /$ $/ \alpha_{3aT}^*]^{0,5} \cdot e^{-67000/T_{3aT}^*}$ $\times (T_{3aT}^*)^{-0,5}$	0,000	0,001	0,000	0,019	0,179	0,252	0,012	$\frac{0,014}{0,000}$
Суммарный удельный выброс оксидов азота $K_{NO_2}$ , г/МДж	$K_{NO_2}^{тпл} + K_{NO_2}^{взд}$	0,135	0,317	0,209	0,379	0,536	0,652	0,331	$\frac{0,57}{0,36}$
Теоретический объем газов $V_{г}^0$ , м³/кг	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)» или эксплуатационные данные	5,03	5,35	5,35	4,25	6,6	6,25	6,39	5,17
Теоретический объем воздуха $V_{в}^0$ , м³/кг		4,28	4,87	4,87	3,92	6,11	5,87	5,95	4,91
Объем водяных паров $V_{H_2O}$ , м³/кг		0,82	0,62	0,62	0,43	0,61	0,45	0,56	0,30
Объем сухих дымовых газов $V_{сг}$ при н.у. и $\alpha=1,4$ , м³/кг	$V_{г}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{в}^0 -$ $- V_{H_2O}^0$	5,92	6,68	6,68	5,39	8,43	8,15	8,21	6,83

Концентрация $\text{NO}_x$ в сухих дымовых газах при н.у. и $\alpha=1,4$ без учета "подсветки" $C_{\text{NO}_2}^{\text{б/п}}$ , г/м <sup>3</sup>	$K_{\text{NO}_2} \cdot Q_i^r / V_{\text{гр}}$	0,36	0,86	0,57	1,03	1,47	1,77	0,91	$\frac{1,52}{0,95}$
Доля газа (мазута) по теплу $\delta_r$ ( $\delta_m$ )	$(B \cdot Q_i^r)_i / \sum (B \cdot Q_i^r)_i$	0	0	0	0	0,42 (газ)	0,10 (мазут)	0	$\frac{0,15}{(\text{газ})}$
Поправочный коэффициент на "подсветку" $A_i$	При сжигании газа с углем $1 - (\delta_r/2,5)^{0,5}$ ; при сжигании мазута с углем $1 - (\delta_m/1,65)^{0,5}$	1	1	1	1	0,590	0,754	1	0,755
Концентрация $\text{NO}_x$ в сухих дымовых газах при н.у. и $\alpha=1,4$ с учетом "подсветки" угля газом (мазутом) $C_{\text{NO}_2}^{\text{п}}$ , г/м <sup>3</sup>	$C_{\text{NO}_2} \cdot A_i$	0,36	0,86	0,57	1,03	0,87	1,33	0,91	$\frac{1,14}{0,72}$
* Если $\alpha_{\text{зг}}^* < 1$ , то $K_{\text{NO}_2}^{\text{зг}}$ принимается равным 0.									

**РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА  
В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ КОТЛА ТГМП-204ХЛ  
ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

**Исходные данные**

Расчеты оксидов азота при сжигании природного газа в котле ТГМП-204ХЛ, представленном на рисунке П.2.1, на номинальной нагрузке выполнялись для трех вариантов, представленных в таблице П.2.1:

1. Ввод газов рециркуляции в дутьевой воздух;
2. Впрыск воды в топку через щелевые форсунки, установленные в центральной части горелочных устройств, и подача газов рециркуляции;
3. Организация двухступенчатого сжигания путем отключения подачи природного газа на третий ярус горелок с вводом газов рециркуляции.

В третьем варианте доля воздуха, подаваемого во вторую ступень, составляет 0,33, а коэффициент избытка воздуха в горелках первого и второго ярусов (при  $\alpha_T = 1,05$ ) рассчитывается следующим образом.

Действительный объем воздуха, подаваемого в топку,  $\text{м}^3/\text{с}$ , при равном количестве горелок в ярусах представляет собой сумму

$$V_B^A = 0,67 \cdot V_B^A + 0,33 \cdot V_B^A, \quad (\text{П.2.1})$$

где  $0,67 \cdot V_B^A$  – объем воздуха, подаваемого в первые два яруса горелок;  
 $0,33 \cdot V_B^A$  – объем воздуха, подаваемого в третий ярус горелок.

Коэффициент избытка воздуха определяется как

$$\alpha = V_B^A / V_B^0, \quad (\text{П.2.2})$$

где  $V_B^0$  – теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ( $\alpha = 1$ ).

Коэффициент избытка воздуха в двух первых ярусах горелок

$$\alpha_T = (0,67 \cdot V_B^A) / V_B^0, \quad (\text{П.2.3})$$

где  $V_B^0 = V_B^A / 1,05$  (исходя из условия  $\alpha_T = 1,05$ ).

Таким образом, избыток воздуха в горелках первых двух ярусов при долях воздуха, подаваемого в первую ступень горения  $\delta = 0,67$  и во вторую ступень горения (третий ярус горелок)  $\delta = 0,33$ , составляет примерно 0,7.



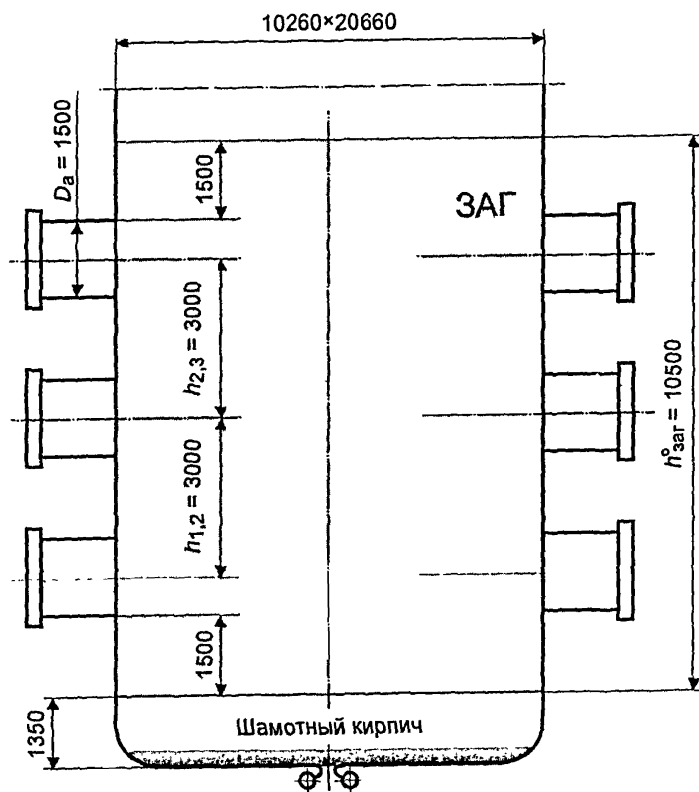


Рис. П.2.1 – Схема ЗАГ котла ТГМП-204ХЛ

Таблица П. 2.1 – Расчет концентрации оксидов азота для котла ТГМП-204ХЛ

Определяемая величина	Размерность	Формула или обоснование	Вариант 1 с вводом газов рециркуляции	Вариант 2 с вводом газов рециркуляции и впрыском воды	Вариант 3 двухступенчатое сжигание с вводом газов рециркуляции
1	2	3	4	5	6
<b>Конструктивные параметры</b>					
Ширина топки в свету $a_T$	м	Исходные данные	20,66	20,66	20,66
Глубина топки в свету $b_T$	м	То же	10,26	10,26	10,26
Диаметр амбразуры горелок $D_a$	м	– " –	1,5	1,5	1,5
Диаметр экранных труб $d_s$	мм	– " –	32	32	32
Угловой коэффициент $\chi$		Котел в газоплотном исполнении	1	1	1
Расстояние между осями горелок:					
первого и второго яруса $h_{1,2}$	м	Исходные данные	3	3	3
второго и третьего яруса $h_{2,3}$	м	То же	3	3	3
Количество работающих по топливу горелок $n_T$	–	– " –	36	36	24

<i>Режимные параметры</i>					
Теплота сгорания топлива $Q_i'$	МДж/м <sup>3</sup>	Исходные данные	35,3	35,3	35,3
Теоретический объем воздуха, необходимого для полного сжигания топлива, $V_{\text{в}}^0$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	То же	9,52	9,52	9,52
Теоретический объем газов, образовавшихся при сжигании топлива при $\alpha = 1,0$ , $V_{\text{г}}^0$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	— " —	10,68	10,68	10,68
Объем трехатомных газов $V_{\text{RO}_2}$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	— " —	1,0	1,0	1,0
Теоретический объем азота $V_{\text{N}_2}^0$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	— " —	7,53	7,53	7,53
Расчетный расход топлива $B_p$	м <sup>3</sup> /с	— " —	55,9	55,9	55,9
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки $\alpha_{\text{т}}'$	—	— " —	1,07	1,05	1,05
Присосы холодного воздуха в топку $\Delta\alpha_{\text{т}}$	—	— " —	0	0	0
Температура горячего воздуха $t_{\text{гв}}$	°С	— " —	360	360	360
Энтальпия горячего воздуха $I_{\text{гв}}^0$	МДж/м <sup>3</sup>	Таблица XVI, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	4,631	4,631	4,631

1	2	3	4	5	6
Температура холодного воздуха $t_{хв}$	°С	Принято согласно «Тепловому расчету котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	30	30	30
Энтальпия холодного воздуха $I_{хв}^0$	МДж/м <sup>3</sup>	Таблица XVI, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,378	0,378	0,378
Доля газов рециркуляции, подаваемых в топку, $R$	–	Исходные данные	0,05	0,05	0,05
Температура газов рециркуляции $t_{гр}$	°С	То же	390	390	390
Энтальпия продуктов сгорания $I_{гр}^0$ при $\alpha = 1,0$ и $t = t_{гр}$	МДж/м <sup>3</sup>	Таблица XVI, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	5,926	5,926	5,926
Энтальпия воздуха $I_{в}^0(t_{гр})$ при $\alpha = 1,0$ и $t = t_{гр}$	МДж/м <sup>3</sup>	То же	5,026	5,026	5,026
Доля воздуха, подаваемого во вторую ступень горения, $\delta$	–	Исходные данные	–	–	0,33
Водотопливное отношение $G_{вл}/G_{тпл}$ (по массе)	кг/кг	То же	–	0,17	–
Плотность природного газа $\rho_{г}^0$	кг/м <sup>3</sup>	– " –	–	0,712	–
Водотопливное соотношение $g$	кг/м <sup>3</sup>	$g = (G_{вл}/G_{тпл}) \rho_{г}^0$	–	0,121	–
Температура воды, подаваемой в топку, $t_{вл}$	°С	Исходные данные	–	20	–
Давление воды, подаваемой в топку, $p_{вл}$	МПа	То же	–	0,1	–

Энтальпия вводимой влаги $i_{вл}$	МДж/кг	Таблица XXIV, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	–	0,084	–
<i>Расчет</i>					
Избыток воздуха в горелке $\alpha_T$	–	$\alpha_T = \alpha_T^* - \Delta\alpha_T$	1,07	1,05	0,7
Коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, $K_T$	–	Таблица 4.1	1	1	1
Коэффициент, учитывающий место ввода газов рециркуляции, $K_R$	–	Таблица 4.3	1	1	1
Тепло, вносимое в ЗАГ с воздухом, $Q_{\text{в}}$	МДж/м <sup>3</sup>	$Q_{\text{в}} = \alpha_T \cdot I_{\text{в}}^0 + 0,5 \cdot \Delta\alpha_T \cdot I_{\text{хв}}^0$	4,995	4,863	3,242
Присосы холодного воздуха в водяном экономайзере $\Delta\alpha_{\text{вэ}}$ (два пакета)	–	Опускной газоход газоплотный; $\Delta\alpha_{\text{вэ}}$ для одного пакета принимается по таблице XVII «Теплового расчета котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,02	0,02	0,02
Коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода на рециркуляцию $\alpha_{\text{отб}}$	–	$\alpha_{\text{отб}} = \alpha_{\text{вэ}}^* = \alpha_T^* + \Delta\alpha_{\text{вэ}}$	1,09	1,07	1,07
Энтальпия газов рециркуляции $I_{\text{гр}}$	МДж/м <sup>3</sup>	$I_{\text{гр}} = I_{\text{гр}}^0 + (\alpha_{\text{отб}} - 1) \cdot I_{\text{в}}^0$	6,378	6,278	6,278
Тепло, вносимое в зону активного горения с рециркулирующими газами, $Q_{\text{гр}}$	МДж/м <sup>3</sup>	$Q_{\text{гр}} = K_R \cdot R \cdot I_{\text{гр}}$	0,319	0,314	0,314

1	2	3	4	5	6
Теплота парообразования $r$	МДж/кг	Таблица XXIII, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	–	2,512	–
Тепло, вносимое в зону активного горения с водой, $Q_{вл}$	МДж/кг	$Q_{вл} = g \cdot (i_{вл} - r)$	–	–0,413	–
Коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения $\alpha_{з\text{аг}}$	–	$\alpha_{з\text{аг}} = \alpha_{\Gamma} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{\Gamma}$	1,07	1,05	0,7
Степень выгорания топлива в зоне активного горения $\beta_{\text{сг}}$	–	Таблица 4.2	0,98	0,95	0,609
<i>1-е приближение</i>					
Ожидаемая адиабатная температура $T_{\text{ад}}$	К	Принимается	2270	2200	2150
Ожидаемая адиабатная температура $\vartheta_{\text{ад}}$	°С	$T_{\text{ад}} - 273$	1997	1927	1877
Температурный коэффициент $k_t$	–	$k_t = (\vartheta_{\text{ад}} - 1200)/1000$	0,797	0,727	0,677
Средняя теплоемкость продуктов сгорания $c_{\Gamma}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.15)	$1,677 \times 10^{-3}$	$1,667 \times 10^{-3}$	$1,661 \times 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха $c_{\text{в}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.17)	$1,533 \times 10^{-3}$	$1,527 \times 10^{-3}$	$1,522 \times 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{\text{вл}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.18)	–	$1,952 \times 10^{-3}$	–

Адиабатная температура горения топлива $T_{ад}$	К	Формула (4.5)	2282	2210	2189
<i>2-е приближение</i>					
Ожидаемая адиабатная температура $T'_{ад}$	К	Принимается	2278	2207	2185
Ожидаемая адиабатная температура $\vartheta_{ад}$	°С	$T_{ад} - 273$	2005	1934	1912
Температурный коэффициент $k_t$	—	$k_t = (\vartheta_{ад} - 1200)/1000$	0,805	0,734	0,712
Средняя теплоемкость продуктов сгорания $c_r$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.15)	$1,678 \cdot 10^{-3}$	$1,668 \cdot 10^{-3}$	$1,665 \cdot 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха $c_v$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.17)	$1,534 \cdot 10^{-3}$	$1,528 \cdot 10^{-3}$	$1,526 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{вл}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$	Формула (4.18)	—	$1,954 \cdot 10^{-3}$	—
Адиабатная температура горения топлива $T_{ад}$	К	Формула (4.5)	2280	2209	2185
Высота зоны активного горения $h_{ЗАГ}^0$	м	Для обычного сжигания – ф-ла (4.26а); для ступенчатого сжигания – ф-ла (4.26б) (см. рисунки 4.1 и П.2.1)	10,5	10,5	8,25
Объем дымовых газов, образовавшихся при сжигании 1 м <sup>3</sup> газа без ввода газов рециркуляции и влаги в ЗАГ, $V_r$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$V_r = \beta_{сг} \cdot V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) V_v^0$	11,337	11,113	7,385

1	2	3	4	5	6
Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м <sup>3</sup> газа при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, $V_{\Gamma}^{R,g}$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Формула (4.28)	11,915	11,903	7,953
Высота зоны активного горения с учетом ввода газов рециркуляции и влаги $h_{\text{ЗАГ}}$	м	$h_{\text{ЗАГ}} = h_{\text{ЗАГ}}^0 \frac{V_{\Gamma}^{R,g}}{V_{\Gamma}}$	11,04	11,25	8,89
Поверхность расположенных в зоне активного горения:					
фронтовых экранов $F_{\Phi}$	м <sup>2</sup>	$F_{\Phi} = a_{\Gamma} \cdot h_{\text{ЗАГ}}$	228,09	232,43	183,67
задних экранов $F_3$	м <sup>2</sup>	$F_3 = a_{\Gamma} \cdot h_{\text{ЗАГ}}$	228,09	232,43	183,67
боковых экранов $F_6$	м <sup>2</sup>	$F_6 = b_{\Gamma} \cdot h_{\text{ЗАГ}}$	113,27	115,43	91,21
горелок $F_{\Gamma}$	м <sup>2</sup>	$F_{\Gamma} = n_{\Gamma} \cdot (\pi/4) D_a^2$	63,61	63,61	53,01
сечений, ограничивающих зону активного горения сверху и снизу, $F_{\text{верх}}$ и $F_{\text{ниж}}$	м <sup>2</sup>	$F_{\text{верх}} = F_{\text{ниж}} = a_{\Gamma} \cdot b_{\Gamma}$	211,97	211,97	211,97
Площадь поверхностей, расположенных ниже ЗАГ, (см. рисунок П.2.1):					
фронтовых экранов $F_{\Phi}^{\text{H}}$	м <sup>2</sup>	$F_{\Phi}^{\text{H}} = 1,35 \cdot a_{\Gamma}$	27,89	27,89	27,89
задних экранов $F_3^{\text{H}}$	м <sup>2</sup>	$F_3^{\text{H}} = 1,35 \cdot a_{\Gamma}$	27,89	27,89	27,89



боковых экранов $F_6^H$	м <sup>2</sup>	$F_6^H = 1,35 \cdot b_T$	13,85	13,85	13,85
пода $F_n$	м <sup>2</sup>	$F_n = a_T \cdot b_T$	211,97	211,97	211,97
Коэффициент тепловой эффективности настенных экранов $\psi_3$	—	Таблица 6.3, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». — СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,65	0,65	0,65
Коэффициент тепловой эффективности пода, закрытого шамотным кирпичом, $\psi_n$	—	То же	0,1	0,1	0,1
Коэффициент, характеризующий отдачу тепла излучением в вышерасположенную зону, $\psi'$	—	Согласно рекомендациям «Теплового расчета котельных агрегатов (нормативный метод)». — СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,1	0,1	0,1
Коэффициент, характеризующий отдачу тепла в сторону пода, $\psi''$	—	$\psi'' = \frac{F_6^H \psi_\phi + 2 \cdot F_6^H \psi_6 + F_3^H \psi_3 + F_n \psi_n}{F_\phi^H + 2 \cdot F_6^H + F_3^H + F_n}$	0,255	0,255	0,255
Средняя тепловая эффективность поверхностей, ограничивающих ЗАГ, $\psi_{ЗАГ}$	—	$\psi_{ЗАГ} = \frac{\sum (\psi_i \cdot F_{ст,i}) + \psi' \cdot F_{верх} + \psi'' \cdot F_{ниж}}{F_{ст} + F_{верх} + F_{ниж}}$	0,432	0,434	0,409
Среднеинтегральная температура продуктов сгорания $\bar{T}_{ЗАГ}$	К	$\bar{T}_{ЗАГ} = T'_{ад} \cdot (1 - \psi_{ЗАГ})^{0,25}$	1979	1916	1916
Полная поверхность зоны активного горения $f_{ЗАГ}$	м <sup>2</sup>	$f_{ЗАГ} = 2 \cdot a_T \cdot b_T + 2 \cdot (a_T + b_T) \cdot h_{ЗАГ}$	1106,66	1119,64	973,70

1	2	3	4	5	6
Теплонапряжение зоны активного горения $q_{3\Lambda\Gamma}$	МВт/м <sup>2</sup>	$q_{3\Lambda\Gamma} = \frac{B_p (\beta_{cr} Q_i + Q_{тл} + Q_{ф} + Q_{в} + Q_{гр} + Q_{вл})}{f_{3\Lambda\Gamma}}$	2,014	1,912	1,440
Отраженный поток в зоне активного горения $q_{3\Lambda\Gamma}^{отр}$	МВт/м <sup>2</sup>	$q_{3\Lambda\Gamma}^{отр} = q_{3\Lambda\Gamma} \cdot (1 - \psi_{3\Lambda\Gamma})$	1,144	1,082	0,851
Коэффициент заполнения топочной камеры $\xi$	—	П. 4.21	0,8	0,8	0,8
Время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ $\tau_{3\Lambda\Gamma}$	с	$\tau_{3\Lambda\Gamma} = \frac{a_T \cdot b_T \cdot h_{3\Lambda\Gamma}}{B_p \cdot V_T^{R, \xi} \cdot \left( \frac{T_{3\Lambda\Gamma}}{273} \right)^{\xi}} \cdot \xi$	0,388	0,409	0,483
Массовая концентрация оксидов азота $NO_2^M$ в пересчете на $NO_2$ во влажных продуктах сгорания при $\alpha_{3\Lambda\Gamma}$	г/м <sup>3</sup>	Формула (4.1)	1,084	0,859	0,824 ( $\alpha_{3\Lambda\Gamma} = 0,7$ )
Теоретический объем образовавшихся сухих газов (при $\alpha = 1,0$ ) $V_{cr}^0$	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$V_{cr}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0$	8,53	8,53	8,53
Массовая концентрация оксидов азота в пересчете на $NO_2$ и стандартные условия (сухие газы, $\alpha = 1,4$ ) $NO_2^{ст.у}$	г/м <sup>3</sup>	Формула (4.30)	0,988	0,771	0,494

## **Содержание**

<b>1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ .....</b>	<b>4</b>
<b>3 РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ .....</b>	<b>9</b>
<b>4 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА И МАЗУТА .....</b>	<b>12</b>
<b>5 РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ С МАЗУТОМ ИЛИ ГАЗОМ .....</b>	<b>21</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Примеры расчета удельных выбросов и концентраций оксидов азота для пылеугольных котлов .....</b>	<b>24</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Расчет концентрации оксидов азота в дымовых газах котла ТГМП-204ХЛ при сжигании природного газа</b>	<b>30</b>



**ВТИ**

Редактор *И.К. Соколова*  
Технический редактор *И.Р. Шанто*  
Корректор *Н.Н. Клюева*  
Компьютерная верстка *Е.В. Беспалова*

---

Подписано в печать 21.02.05. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печ. л. 2,75. Тираж 350 экз. Заказ № 61 .

---

ПМБ ВТИ. 115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23