

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Дата введения 2003-07-01

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 N 286 от 30.06.2003

Министр энергетики И.Х.Юсуфов

ВЗАМЕН РД 34.02.304-95

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 NO_x (главным образом монооксид NO и в меньшей степени диоксид 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 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 NO составляет 95-99% общего выброса NO_x , в то время как содержание более токсичного диоксида азота NO_2 не превышает 1-5%. После выброса дымовых газов в атмосферу под воздействием природных факторов большая часть NO конвертирует в NO_2 . Поэтому расчет массовых концентраций и выбросов оксидов азота NO_x ведется в пересчете на NO_2 .

В связи с установленными отдельными ПДК в атмосферном воздухе на монооксид NO и диоксид азота

NO_2 и с учетом трансформации оксидов азота в атмосфере при расчете загазованности и нормировании выбросов 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_{NO} и M_{NO_2} - молярные массы NO и NO_2 , 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^3 или мг/м^3 .

В отличие от объемной массовая концентрация зависит от давления и температуры среды, поэтому ее приводят в пересчете на нормальные условия (0°C , $P_0 = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101,3 \text{ кПа}$), для чего используется следующее выражение:

$$C_m^{\text{ну}} = C_m^{\text{оп}} \cdot \frac{273 + \vartheta_T}{273} \cdot \frac{P_0}{P_T}, \quad (2.2)$$

где $C_m^{\text{оп}}$ - массовая концентрация, полученная опытным путем при температуре ϑ_T и давлении P_T газовой пробы.

2.3 Связь между объемными (ppm) и массовыми (г/м³) концентрациями устанавливается следующим соотношением:

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

где k_i - коэффициент пересчета, равный

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

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); ϑ_{Γ} - температура и p_{Γ} - 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 ₂	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***, в качестве которых приняты следующие: $\alpha_{ух} = 1,4$ в сухих дымовых газах при нормальных условиях [0 °С и 101,3 кПа (760 мм рт.ст.)].

* ГОСТ Р 50831-95 "Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования".

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 ($C^{ст.у}$) для сухих газов:

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

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

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

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

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

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

2.5 Значения $V_{\text{В}}^0$, V_{Γ}^0 , $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ принимаются по справочным данным или рассчитываются по химическому составу сжигаемого топлива:

для твердого и жидкого топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$)

$$V_{\text{В}}^0 = 0,0889(C^r + 0,375S_{\text{ор+к}}^r) + 0,265H^r - 0,0333O^r; \quad (2.9)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111H^r + 0,0124W^r + 0,0161V^0; \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} V_{\Gamma}^0 &= V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \\ &= 1,866 \frac{C^r + 0,375S_{\text{ор+к}}^r}{100} + 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^r}{100} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где C^r , $S_{\text{ор+к}}^r$, 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 ($\text{м}^3/\text{м}^3$)

$$V^0 = 0,0476[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum (m + \frac{n}{4})C_m\text{H}_n - \text{O}_2]; \quad (2.12)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01[\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum \frac{n}{2}C_m\text{H}_n + 0,124d_{\text{г.тл}}] + 0,0161V^0; \quad (2.13)$$

$$V_{\Gamma}^0 = 0,01[\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum mC_m\text{H}_n] + 0,79V^0 + \frac{N_2}{100} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \quad (2.14)$$

где CO , CO_2 , H_2 , H_2S , $C_m\text{H}_n$, 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; $d_{\text{г.тл}}$ - влагосодержание газообразного топлива, $\text{г}/\text{м}^3$.

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/м³) представляет собой количество вредного вещества в граммах, образовавшегося при сжигании 1 кг (или м³) топлива:

$$m_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_{\Gamma} \quad (2.15)$$

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

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

где $Q_{\text{усл. топл.}}$ - теплота сгорания условного топлива, равная 29,31 МДж/кг (7000 ккал/кг); Q_i^* - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³).

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:

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

где B_p - расчетный расход топлива (кг/с).

2.9 Для пересчета указанных параметров используются следующие соотношения:

$$K_{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} \cdot V_{\Gamma} / Q_i^*; \quad (2.18)$$

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

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

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

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

где C_{NO_2} - массовая концентрация NO_2 при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт.ст.), г/м³; V_{Γ} - объем дымовых газов, м³/кг (м³/м³), определяемый следующим образом:

- если концентрация C_{NO_2} определена во влажных газах,

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{\text{B}}^0; \quad (2.23)$$

- если концентрация C_{NO_2} определена в сухих продуктах сгорания,

$$V_{\Gamma} = V_{\text{CT}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{B}}^0; \quad (2.24)$$

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

где α - коэффициент избытка воздуха для условий, при которых производилось определение концентрации C_{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:

$A^r, W^r \text{ и } N^r$	- зольность, влажность и содержание азота в топливе, % на рабочую массу.
Q_i^r	- теплота сгорания топлива, МДж/кг.
Тип горелок	- вихревые, прямоточные, с подачей пыли высокой концентрации.
V_{daf}^r	- выход летучих на горючую массу, %.
α_{Γ}	- коэффициент избытка воздуха в горелках.
α_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.
$\Delta\alpha_{\text{сбр}}$	- 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 NO_2) K_{NO_2} (г/МДж) складываются из топливных $K_{\text{NO}_2}^{\text{ТПП}}$ и воздушных $K_{\text{NO}_2}^{\text{ВЗД}}$ оксидов азота:

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

3.3 Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

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

где ξ_{NO_x} - безразмерный коэффициент, учитывающий характеристики топлива

$$\xi_{NO_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d). \quad (3.3)$$

Здесь FR - топливный коэффициент, равный отношению связанного углерода к выходу летучих на рабочую массу: $FR = C^{CB} / V^r$, где $C^{CB} = 100 - W^r - A^r - V^r$; 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 $\beta_{\alpha_T}^{вхр}$	$(0,35 \cdot \alpha_T + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_T \leq 1,3$
Влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha_T}^{прм}$	$(0,53 \cdot \alpha_T + 0,12)^2$	$0,9 \leq \alpha_T \leq 1,3$
Влияние доли первичного воздуха в горелке β_{α_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) β_R	$1 - 0,016 \sqrt{R}$	$(0 \leq R \leq 30)\%$
Влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота $\beta_{T_{3AG}}$	$0,11 \cdot \sqrt[3]{T_{3AG}'' - 1100}$	$1250 \text{ К} \leq T_{3AG}'' \leq 2050 \text{ К}$
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\beta_{см}^{вхр}$	$0,4 \cdot (w_2/w_1)^2 + 0,32$	$1,0 \leq w_2/w_1 \leq 1,6$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\beta_{см}^{прм}$	$0,98 \cdot w_2/w_1 - 0,47$	$1,4 \leq w_2/w_1 \leq 4,0$

3.4 При подаче в горелки пыли высокой концентрации значение $K_{NO_2}^{тпц}$, подсчитанное по формуле (3.2), умножают на коэффициент 0,8. При этом долю первичного воздуха α_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, $K_{NO_2}^{взд}$ определяется в основном не особенностями горелок, а интегральными параметрами топочного процесса.

Для подсчета $K_{NO_2}^{взд}$ используют зависимость, учитывающую известное уравнение Зельдовича:

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

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.

$$\alpha_{3\text{AG}}'' = \alpha_{\Gamma} + \frac{1}{2} \Delta \alpha_{\Gamma}; \quad (3.5)$$

$T_{3\text{AG}}''$ - 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 $K_{\text{NO}_2}^{\text{взп}}$ 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:

$$\vartheta_{3\text{AG}}'' = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{\text{сг}}^{3\text{AG}} \cdot Q_i^* + Q_{\text{в}} + i_{\text{шт}}}{(V_{\text{с}})_{\Gamma}} - \frac{2,05 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_{\text{T}} \cdot (T_{3\text{AG}}'')^4 \psi F}{B_{\text{р}} \cdot (V_{\text{с}})_{\Gamma}}, \quad (3.6)$$

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); $\beta_{\text{сг}}^{3\text{AG}}$ - степень выгорания топлива в зоне активного горения; $i_{\text{шт}}$ - энтальпия топлива, МДж/кг; ψF - произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону активного горения, м²; ε_{T} - степень черноты топки в зоне максимального тепловыделения.

Приведенное уравнение решается методом последовательных приближений, т.к. в его правую часть входит $T_{3\text{AG}}'' = \vartheta_{3\text{AG}}'' + 273$. Если расчетное значение $\vartheta_{3\text{AG}}''$ по формуле (3.6) будет более чем на 50 °С отличаться от предварительно выбранной величины $T_{3\text{AG}}''(\vartheta_{3\text{AG}}'')$, то необходимо сделать второе приближение.

При наличии рециркуляции дымовых газов расчет $\vartheta_{3\text{AG}}''$ 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, $D/D_{ном}$	0,5-1,0;
коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения (ЗАГ) $\alpha_{ЗАГ}$	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, δ	0-0,33.

Пример расчета концентрации оксидов азота в дымовых газах котла ТГМП-204ХЛ при сжигании природного газа приведен в приложении 2 к настоящему 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;
$h_{яp}$	- расстояние между осями соседних (по высоте) горелок, м; при неравенстве расстояний между ярусами (при $Z_{яp} \geq 3$) определяются расстояния между первым и вторым ярусами горелок $h_{1,2}$, вторым и третьим $h_{2,3}$ и т.д.;
h_{δ}	- расстояние между осью верхнего яруса и осью сопел вторичного дутья (в случае двухступенчатого сжигания топлива);
тип горелок	<ul style="list-style-type: none"> * унифицированные и оптимизированные; * двухпоточные стадийного сжигания; * многопоточные стадийного сжигания; * многопоточные стадийного сжигания с подачей части топлива в инертные газы;
D_a	- диаметр амбразуры горелок, м;
n_{Γ}	- количество горелок;
d_3	- диаметр экранных труб поверхностей нагрева в топке, мм;
ε	- шаг экранных труб, мм;
Z_3	- число двусветных экранов.

б) характеристики топлива

Q_i^r	- теплотворная способность топлива, МДж/кг (МДж/м ³);
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 ³ /кг (м ³ /м ³);
V_{Γ}^0	- объем продуктов сгорания, образовавшихся при стехиометрическом ($\alpha = 1,0$) сжигании топлива, м ³ /кг (м ³ /м ³);

V_{RO_2} - объем трехатомных газов, полученных при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, $m^3/kg (m^3/m^3)$;

$V_{N_2}^0$ - теоретический объем азота, полученный при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, $m^3/kg (m^3/m^3)$;

е) режимные параметры

B_p - расчетный расход топлива, $kg/c (m^3/c)$; при наличии двусветного экрана B_p принимается на одну ячейку;

$t_{тп}$ - температура топлива (при сжигании мазута), °C;

$g_{ф}$ - удельный расход форсуночного пара, идущего на распыл мазута, $kg \text{ пара} / kg \text{ мазута}$;

$t_{ф}$ - температура пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, °C;

$p_{ф}$ - давление пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, МПа;

$t_{гв}$ - температура горячего воздуха, °C;

$\alpha_{г}''$ - коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;

$\Delta\alpha_{г}$ - присосы холодного воздуха в топку;

R - доля рециркуляции дымовых газов в зону активного горения (0-0,35);

$t_{гр}$ - температура газов в месте отбора на рециркуляцию, °C;

g - водотопливное отношение в долях ($g = G_{вл} / G_{тп} = 0 - 0,35$);

$t_{вл}$ - температура воды (или пара), подаваемой в ЗАГ, °C;

$p_{вл}$ - давление воды (или пара), подаваемой в ЗАГ, МПа;

δ - доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения при двухступенчатом сжигании (0-0,35).

4.2 Массовая концентрация оксидов азота (в пересчете на NO_2) во влажных продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха в зоне активного горения ($\alpha_{ЗАГ}^3$) для нормальных условий (0 °C, 101,3 кПа или 760 мм рт.ст.) определяется по формулам:

при сжигании газа:

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

при сжигании мазута:

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^M = 2,05 \cdot 10^{-3} K_{\Gamma} & \left\{ \left[24,3 \cdot \exp \left(0,19 \cdot \frac{\bar{T}_{3\text{AG}} - 1650}{100} \right) - 12,3 \right] \times \right. \\ & \times \left[\exp(q_{3\text{AG}}^{\text{отр}}) - 1 \right] \times \left[15,1 - 131,7 \cdot (\alpha_{3\text{AG}} - 1,09)^4 + 72,3 \cdot (\alpha_{3\text{AG}} - 1,09)^3 + \right. \\ & \left. \left. + 73,0 \cdot (\alpha_{3\text{AG}} - 1,09)^2 + 2,8 \cdot (\alpha_{3\text{AG}} - 1,09) \right] \cdot \tau_{3\text{AG}} + \Delta \text{NO}_2^{\text{шт}} \right\}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где $\bar{T}_{3\text{AG}}$ - среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения, К; $q_{3\text{AG}}^{\text{отр}}$ - отраженный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м²; $\alpha_{3\text{AG}}$ - коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения; $\tau_{3\text{AG}}$ - время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения, с; K_{Γ} - коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, определяемый по таблице 4.1; $\Delta \text{NO}_2^{\text{шт}}$ - член, учитывающий количество топливных оксидов азота при превышении содержания азота в составе мазута 0,3%, рассчитываемый как:

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

где V_{Γ} - объем продуктов сгорания в ЗАГ, определяемый согласно пп.4.19, 4.20 данной методики.

Таблица 4.1 - Значения коэффициента K_{Γ} 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):

$$\bar{T}_{3\text{AG}} = T_{\text{ад}} \cdot (1 - \psi_{3\text{AG}})^{0,25}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{ад}}$ - адиабатная температура горения топлива, К; $\psi_{3\text{AG}}$ - средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ.

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

$$\begin{aligned} T_{\text{ад}} = & \left[\beta_{\text{сг}} \cdot Q_i^r + Q_{\text{шт}} + Q_{\text{ф}} + \alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{в}}^0 + \Delta \alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{хв}} + K_R \cdot R \cdot I_{\text{гр}} + g(i_{\text{вл}} - r) \right] / \\ & i \left[\beta_{\text{сг}} \cdot V_{\Gamma}^0 \cdot c_{\Gamma} + 1,0161 \cdot (\alpha_{3\text{AG}} - \beta_{\text{сг}}) \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot c_{\text{в}} + 1,24 \cdot g \cdot c_{\text{вл}} + \right. \\ & \left. + K_R \cdot R (V_{\Gamma}^0 \cdot c_{\Gamma} + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{отб}} - 1) \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot c_{\text{в}} + 1,24 \cdot g \cdot c_{\text{вл}}) \right] + 273, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\beta_{\text{сг}}$ - степень выгорания топлива в ЗАГ, определяемая по таблице 4.2 в зависимости от вида сжигаемого топлива; Q_i^* - теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³); K_R - коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3; V_B^0 и V_{Γ}^0 - соответственно теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания, м³/кг (м³/м³); $\alpha_{\text{отб}}$ - коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода 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 $Q_{\text{ш}} = 0$), МДж/кг:

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

Теплоемкость мазута, МДж/(кг·°С)

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

где $t_{\text{ш}}$ - температура мазута, °С.

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

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

где $g_{\text{ф}}$ - удельный расход пара через форсунку на 1 кг мазута, кг/кг; $i_{\text{ф}}$ - энтальпия пара, подаваемого на

распыл, МДж/кг.

Параметры пара, поступающего на распыл мазута, обычно составляют $p_{\phi} = 0,3-0,6$ МПа, $t_{\phi} = 280-350$ °С, ξ_{ϕ} 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 $\alpha_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma}^{\#} - \Delta\alpha_{\Gamma}$ - избыток воздуха в горелке при наличии присосов воздуха в топку; $I_{\text{в}}^0$ и $I_{\text{хв}}^0$ - энтальпии теоретически необходимого количества воздуха при температуре горячего и холодного воздуха, МДж/кг (МДж/м³).

4.8 Теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/кг (МДж/м³)

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

Здесь K_R - коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3; R - доля рециркуляции дымовых газов; $I_{\text{гр}}$ - энтальпия газов рециркуляции, подаваемых в ЗАГ, МДж/кг (МДж/м³), вычисляемая как:

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

где $\alpha_{\text{отб}}$ - коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода на рециркуляцию (обычно $\alpha_{\text{отб}} = \alpha_{\text{вЭП}}^{\#}$); $I_{\text{гр}}^0$ и $I_{\text{в}}^0$ - соответственно энтальпии газов рециркуляции и теоретически необходимого количества воздуха при температуре газов рециркуляции (МДж/м³), рассчитываемые в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

4.9 Теплота, вносимая в зону активного горения при подаче воды или пара, МДж/кг (МДж/м³),

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

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

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

$G_{\text{вл}}$, $G_{\text{маз}}$, $G_{\text{газ}}$ - соответственно расход влаги, мазута и газа, кг/с; $\rho_{\text{газ}}^0$ - плотность сухого природного газа при 0 °С и 101,3 кПа (760 мм рт.ст.); $i_{\text{вл}}$ - энтальпия влаги (воды или пара), поступающей в зону активного горения, МДж/кг (МДж/м³); 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 $\alpha_{ЗАГ}$:

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

4.11 Средняя теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(м³·°С):

при сжигании природного газа

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

при сжигании мазута

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

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

4.12 Теплоемкость воздуха при высоких температурах, МДж/(м³·°С)

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

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

4.13 Теплоемкость водяных паров, МДж/(м³·°С)

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

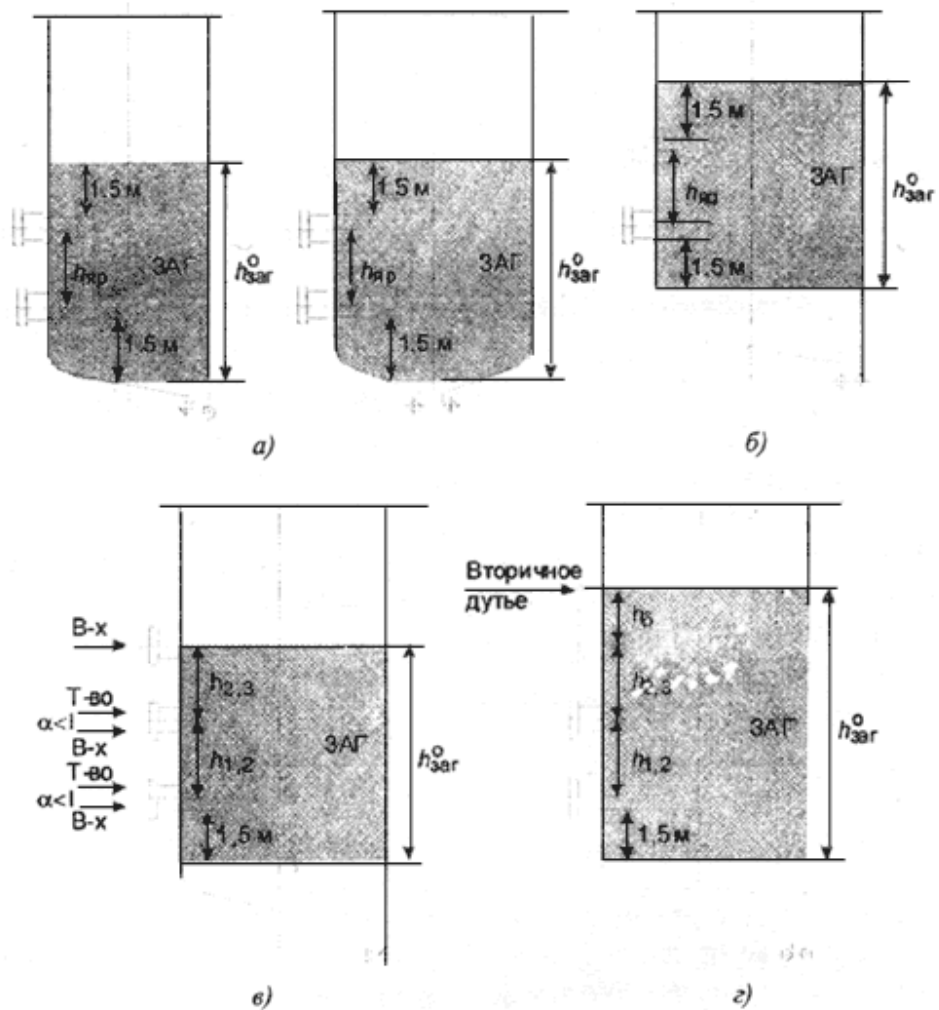
4.14 Средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ, $\Psi_{ЗАГ}$:

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

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, м²; $F_{ст_i}$, ψ_i - соответственно площадь участка стены ЗАГ, м², и тепловая эффективность этого участка; ψ' - коэффициент, характеризующий отдачу теплоты излучением в вышерасположенную зону:

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

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



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

Рис.4.1* - Схемы определения зоны активного горения

* Качество рисунка соответствует бумажному оригиналу. - Примечание "КОДЕКС".

Коэффициент ψ'' характеризует отдачу теплоты в сторону пода топки:

- если под не включен в объем ЗАГ:

$$\psi'' = \frac{F_{\Phi}^H \cdot \psi_{\Phi} + 2 \cdot F_{\text{б}}^H \cdot \psi_{\text{б}} + F_3^H \cdot \psi_3 + F_{\Pi} \cdot \psi_{\Pi}}{F_{\Phi}^H + 2 \cdot F_{\text{б}}^H + F_3^H + F_{\Pi}}, \quad (4.20)$$

где F_{Φ}^H , $F_{\text{б}}^H$, F_3^H , F_{Π} - соответственно площади фронтного, боковых, и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода, м² (см. схемы на рисунке 4.1); ψ_{Φ} , $\psi_{\text{б}}$, ψ_3 , ψ_{Π} - соответственно тепловая эффективность фронтного, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода;

- если под включен в объем ЗАГ:

$$\psi'' = \psi_{\text{п}}. \quad (4.21)$$

4.15 Отраженный поток в зоне активного горения $q_{\text{ЗАГ}}^{\text{отр}}$, МВт/м²,

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

4.16 Теплонапряжение зоны активного горения, МВт/м²,

$$q_{\text{ЗАГ}} = \frac{B_{\text{р}} \cdot (\beta_{\text{сг}} \cdot Q_i' + Q_{\text{ш}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{гр}} + Q_{\text{вл}})}{f_{\text{ЗАГ}}}, \quad (4.23)$$

где $B_{\text{р}}$ - расчетный расход топлива, кг/с (м³/с), (при наличии в топке двухцветного экрана $B_{\text{р}}$ принимается на одну ячейку).

4.17 Полная поверхность зоны активного горения, м²,

$$f_{\text{ЗАГ}} = 2 \cdot a_{\text{T}} \cdot b_{\text{T}} + 2(a_{\text{T}} + b_{\text{T}}) \cdot h_{\text{ЗАГ}}. \quad (4.24)$$

где a_{T} , b_{T} - соответственно ширина фронта и глубина топочной камеры, м, [при наличии в топке двухцветных экранов принимается ширина одной ячейки $a_{\text{T}}^{\text{я}} = a_{\text{T}} / (Z_3 + 1)$, Z_3 - число двухцветных экранов].

4.18 Высота зоны активного горения $h_{\text{ЗАГ}}$, м,

$$h_{\text{ЗАГ}} = h_{\text{ЗАГ}}^0 \frac{V_{\text{Г}}^{\text{R,г}}}{V_{\text{Г}}}, \quad (4.25)$$

где $h_{\text{ЗАГ}}^0$ - высота зоны активного горения без учета ввода в нее газов рециркуляции и влаги, м; $V_{\text{Г}}$ - объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м³ газообразного) топлива в ЗАГ, м³/кг (м³/м³); $V_{\text{Г}}^{\text{R,г}}$ - объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м³ газообразного) топлива при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, м³/кг (м³/м³).

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

- при обычном сжигании

$$h_{\text{ЗАГ}}^0 = \sum_{i=1}^n h_{\text{я}i} + D_{\text{а}} + 3; \quad (4.26a)$$

- при ступенчатом сжигании

$$h_{\text{ЗАГ}}^0 = \sum_{i=1}^n h_{\text{я}i} + h_{\text{б}} + 0,5 \cdot D_{\text{а}} + 1,5, \quad (4.26b)$$

где $h_{\text{я}i}$ - расстояние между осями горелок по высоте между ярусами, м; n - количество ярусов; $h_{\text{б}}$ -

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 м³ газообразного) топлива в ЗАГ, V_{Γ} , м³/кг (м³/м³):

$$V_{\Gamma} = \beta_{\text{сг}} \cdot V_{\Gamma}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{3AG} - \beta_{\text{сг}}) \cdot V_{\text{в}}^0. \quad (4.27)$$

4.20 Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг жидкого (1 м³ газообразного) топлива в случае ввода в ЗАГ газов рециркуляции и/или влаги, $V_{\Gamma}^{R,g}$, м³/кг (м³/м³):

$$V_{\Gamma}^{R,g} = \beta_{\text{сг}} \cdot V_{\Gamma}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{3AG} - \beta_{\text{сг}}) \cdot V_{\text{в}}^0 + 1,24 \cdot g + \\ + K_R \cdot R \cdot [V_{\Gamma}^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{отб}} - 1) \cdot V_{\text{в}}^0 + 1,24 \cdot g]. \quad (4.28)$$

4.21 Время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения τ_{3AG} (с) определяется как

$$\tau_{3AG} = \frac{a_{\Gamma} \cdot b_{\Gamma} \cdot h_{3AG}}{B_p \cdot V_{\Gamma}^{R,g} \cdot (\bar{T}_{3AG}/273)} \cdot \xi, \quad (4.29)$$

где ξ - 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/м³:

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

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_{NO_2} (г/м^3) проводится для твердого топлива в соответствии с разделом 3 настоящих Методических указаний, а затем значение полученной концентрации C_{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

$$\delta_i = \frac{B_{\text{Рi}} (Q_i^r)_i}{B_{\text{Рy}} (Q_i^r)_y + B_{\text{Рi}} (Q_i^r)_i}, \quad (5.3)$$

где $B_{\text{Рi}}$ - расчетный расход газа или мазута, $\text{м}^3/\text{с}$ (кг/с); $(Q_i^r)_i$ - теплота сгорания газа или мазута, МДж/м^3 (МДж/кг); $B_{\text{Рy}}$ и $(Q_i^r)_y$ - то же, для угля, кг/с и МДж/кг .

5.2.2 Определения удельных выбросов K_{NO_2} (г/МДж) производятся по уравнению (2.20), в правую часть которого подставляется полученная величина C_{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:

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

$$(Q_i^r)_{\text{см}} = \delta_{\text{М}} (Q_i^r)_{\text{М}} + (1 - \delta_{\text{М}}) (Q_i^r)_{\text{У}}, \quad (5.5)$$

где $\delta_{\text{М}}$ - доля мазута по теплоте, определяемая по (5.3); $(V_{\text{сг}})_{\text{М}}$ - объем сухих дымовых газов ($\text{м}^3/\text{кг}$), образующихся при полном сгорании мазута при $\alpha = 1,4$ (см. раздел 2); $(Q_i^r)_{\text{М}}$ - 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:

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

$$(Q_i^r)_{\text{см}} = (Q_i^r)_{\text{У}} + x (Q_i^r)_{\text{Г}}, \quad (5.7)$$

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

Если смесь топлив задана долями тепловыделения каждого топлива (δ_y и δ_r), то количество газа x , приходящееся на 1 кг твердого топлива, рассчитывается как

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

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	Нерюнгринский ЗСС	Донецкий АШ
Зольность A^r , %	"Тепловой расчет котлов (нормативный метод)"; Табл.1 - 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^{daf} , %		48,0	41,5	41,5	25	33,5	14	20	4
Теплота сгорания Q_i^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 , %	$(100W^r - A^r)/100$	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^{CB} / V^*	1,08	1,41	1,41	3,00	1,99	6,14	4,00	24,00
Влияние характеристик топлива на оксиды азота ξ_{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	Прямые	Прямые	Прямые	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые / прямые
Коэффициент избытка воздуха в горелках α_{Γ}	"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 α_1	То же	0,14	0,24	0,24	0,3	0,3	0,2	0,3	$\frac{0,15}{0,15}$
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 $T_{ЗАГ}$, К	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 $\Delta\alpha_{\Gamma}$	То же	0,1	0,1	0,1	0,02	0,1	0,1	0,02	0,1
Третичное дутье α_{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 $\alpha_{ЗАГ}^{\#}$	$\alpha_{\Gamma} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{\Gamma}$	1,15	1,17	1,00	1,21	1,15	1,15	1,11	$\frac{1,05}{0,92}$
Влияние α_{Γ} на образование топливных оксидов азота $\beta_{\alpha_{\Gamma}}$	Для вихревой горелки $(0,35 \cdot \alpha_{\Gamma} + 0,4)^2$, для прямой горелки $(0,53 \cdot \alpha_{\Gamma} + 0,12)^2$	0,494	0,509	0,389	0,672	0,616	0,616	0,616	$\frac{0,563}{0,338}$
Влияние α_1 на образование топливных оксидов азота β_{α_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	$1 - 0,016 \cdot R^{0,5}$	0,930	0,972	0,972	1,00	1,00	1,00	1,00	$\frac{1,00}{1,00}$

азота β_R									
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 смешения 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	$\frac{1,34}{1,49}$
Удельный выброс топливных оксидов азота $K_{NO_2}^{ТПП}$, г/МДж	$0,12 \cdot \xi_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_T} \cdot \beta_{\alpha_1} \times$ $\times \beta_R \cdot \beta_{T_{3AG}''} \cdot \beta_{см}$	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*	$1,54 \cdot 10^{-16} \cdot [(\alpha_{3AG}'' - 1) /$ $/\alpha_{3AG}'']^{0,5} \cdot e^{-67000/T_{3AG}''}$ $\times (T_{3AG}'')^{-0,5}$	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	$K_{NO_2}^{ТПП} + K_{NO_2}^{ВЗД}$	0,135	0,317	0,209	0,379	0,536	0,652	0,331	$\frac{0,57}{0,36}$
Теоретический объем газов V_G^0 , м ³ /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_B^0 , м ³ /кг		4,28	4,87	4,87	3,92	6,11	5,87	5,95	4,91
Объем водяных паров V_{H_2O} , м ³ /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 $\alpha = 1,4$, м ³ /кг	$V_G^0 + (1,4 - 1) \cdot V_B^0 - V_{H_2O}^0$	5,92	6,68	6,68	5,39	8,43	8,15	8,21	6,83
Концентрация NO_x в сухих дымовых газах при н.у. и $\alpha = 1,4$ без учета "подсветки" $C_{NO_2}^{б/п}$, г/м ³	$K_{NO_2} \cdot Q_i^* / V_{сг}$	0,36	0,86	0,57	1,03	1,47	1,77	0,91	$\frac{1,52}{0,95}$
Доля газа (мазута) по теплу δ_T (δ_M)	$(B \cdot Q_i^*)_i / \sum (B \cdot Q_i^*)_i$	0	0	0	0	0,42 (газ)	0,10 (мазут)	0	$\frac{0,15}{(газ)}$
Поправочный коэффициент на	При сжигании газа с	1	1	1	1	0,590	0,754	1	0,755

"подсветку" A_i	углем $1 - (\delta_T / 2,5)^{0,5}$; при сжигании мазута с углем $1 - (\delta_M / 1,65)^{0,5}$								
Концентрация NO_x в сухих дымовых газах при н.у. и $\alpha = 1,4$ с учетом "подсветки" угля газом (мазутом) $C_{NO_2}^п$, г/м ³	$C_{NO_2} \cdot A_i$	0,36	0,86	0,57	1,03	0,87	1,33	0,91	<u>1,14</u> 0,72
* Если $\alpha_{ЗАГ}^* < 1$, то $K_{NO_2}^{взп}$ принимается равным 0.									

Приложение 2
К методическим указаниям
по расчету выбросов оксидов азота
с дымовыми газами котлов
тепловых электростанций

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.

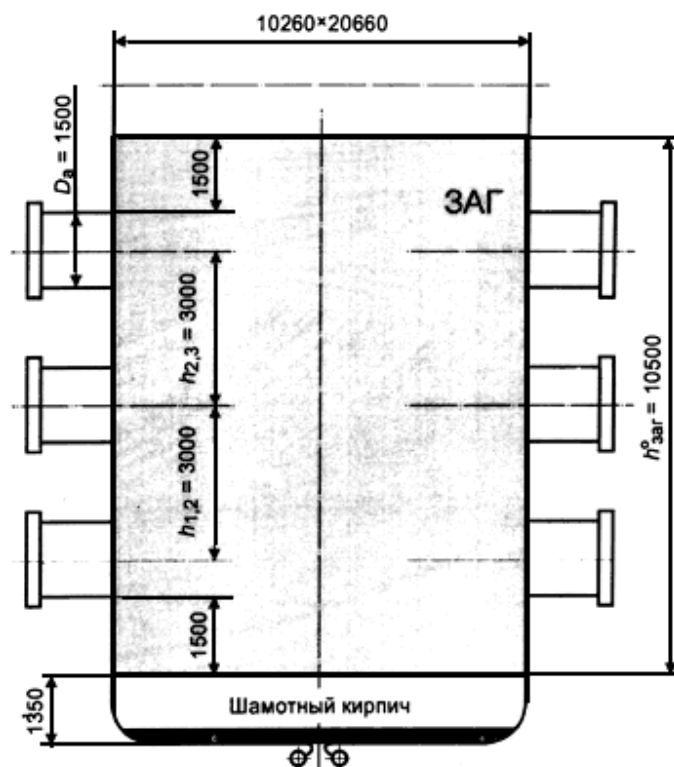


Рис.П.2.1 - Схема ЗАГ котла ТГМП-204ХЛ

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

Определяемая величина	Размерность	Формула или обоснование	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
			с вводом газов рециркуляции	с вводом газов рециркуляции и впрыском воды	двухступенчатое сжигание с вводом газов рециркуляции
1	2	3	4	5	6
Конструктивные параметры					
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_3	мм	-	32	32	32

Угловой коэффициент χ		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_{Γ}	-	-	36	36	24
Режимные параметры					
Теплота сгорания топлива Q_{Γ}^*	МДж/м ³	Исходные данные	35,3	35,3	35,3
Теоретический объем воздуха, необходимого для полного сжигания топлива, $V_{\text{в}}^0$	м ³ /м ³	То же	9,52	9,52	9,52
Теоретический объем газов, образовавшихся при сжигании топлива при $\alpha = 1,0$, V_{Γ}^0	м ³ /м ³	-	10,68	10,68	10,68
Объем трехатомных газов V_{RO_2}	м ³ /м ³	-	1,0	1,0	1,0
Теоретический объем азота $V_{\text{N}_2}^0$	м ³ /м ³	-	7,53	7,53	7,53
Расчетный расход топлива B_{p}	м ³ /с	-	55,9	55,9	55,9
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_{T}^*	-	-	1,07	1,05	1,05
Присосы холодного воздуха в топку $\Delta\alpha_{\text{T}}$	-	-	0	0	0
Температура	°С	-	360	360	360

горячего воздуха $t_{ГВ}$					
Энтальпия горячего воздуха $i_{ГВ}^0$	МДж/м ³	Таблица XVI, "Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)". - СПб.: ЦКТИ, 1998.	4,631	4,631	4,631
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 ³	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 ³	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 ³	То же	5,026	5,026	5,026
Доля воздуха, подаваемого во вторую ступень горения, δ	-	Исходные данные	-	-	0,33
Водотопливное отношение $G_{ВЛ}/G_{ТЛП}$ (по массе)	кг/кг	То же	-	0,17	-
Плотность природного газа $\rho_{Г}^0$	кг/м ³	"-	-	0,712	-
Водотопливное соотношение g	кг/м ³	$g = (G_{ВЛ}/G_{ТЛП}) \cdot \rho_{Г}^0$	-	0,121	-
Температура воды, подаваемой в топку, $t_{ВЛ}$	°С	Исходные данные	-	20	-
Давление воды, подаваемой в	МПа	То же	-	0,1	-

топку, $P_{\text{вп}}$					
Энтальпия вводимой влаги $i_{\text{вп}}$	МДж/кг	Таблица XXIV, "Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)". - СПб.: ЦКТИ, 1998.	-	0,084	-
Расчет					
Избыток воздуха в горелке α_{Γ}	-	$\alpha_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma}'' - \Delta\alpha_{\Gamma}$	1,07	1,05	0,7
Коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, K_{Γ}	-	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 ³	$Q_{\text{в}} = \alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{в}}^0 + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{\Gamma} \cdot I_{\text{хв}}^0$	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 $\alpha_{\text{отб}}$	-	$\alpha_{\text{отб}} = \alpha_{\text{вэ}}'' = \alpha_{\Gamma}'' + \Delta\alpha_{\text{вэ}}$	1,09	1,07	1,07
Энтальпия газов рециркуляции $I_{\text{гр}}$	МДж/м ³	$I_{\text{гр}} = I_{\text{гр}}^0 + (\alpha_{\text{отб}} - 1) \cdot I_{\text{в}}^0$	6,378	6,278	6,278
Тепло, вносимое в зону активного горения с рециркулирующими газами, $Q_{\text{гр}}$	МДж/м ³	$Q_{\text{гр}} = K_R \cdot R \cdot I_{\text{гр}}$	0,319	0,314	0,314
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,	МДж/кг	$Q_{\text{вп}} = g \cdot (i_{\text{вп}} - r)$	-	-0,413	-

$Q_{\text{вп}}$					
Коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения $\alpha_{\text{ЗАГ}}$	-	$\alpha_{\text{ЗАГ}} = \alpha_{\text{Г}} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{\text{Г}}$	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
1-е приближение					
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 $c_{\text{Г}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.15)	$1,677 \times 10^{-3}$	$1,667 \times 10^{-3}$	$1,661 \times 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха $c_{\text{в}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.17)	$1,533 \times 10^{-3}$	$1,527 \times 10^{-3}$	$1,522 \times 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{\text{вп}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.18)	-	$1,952 \times 10^{-3}$	-
Адиабатная температура горения топлива $T_{\text{ад}}$	К	Формула (4.5)	2282	2210	2189
2-е приближение					
Ожидаемая адиабатная температура $T'_{\text{ад}}$	К	Принимается	2278	2207	2185
Ожидаемая адиабатная температура $\vartheta_{\text{ад}}$	°С	$T_{\text{ад}} - 273$	2005	1934	1912
Температурный коэффициент k_t	-	$k_t = (\vartheta_{\text{ад}} - 1200) / 1000$	0,805	0,734	0,712

Средняя теплоемкость продуктов сгорания c_T	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$	Формула (4.15)	$1,678 \cdot 10^{-3}$	$1,668 \cdot 10^{-3}$	$1,665 \cdot 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха c_B	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$	Формула (4.17)	$1,534 \cdot 10^{-3}$	$1,528 \cdot 10^{-3}$	$1,526 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{\text{вп}}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$	Формула (4.18)	-	$1,954 \cdot 10^{-3}$	-
Адиабатная температура горения топлива $T_{\text{ад}}$	К	Формула (4.5)	2280	2209	2185
Высота зоны активного горения $h_{\text{ЗАГ}}^0$	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 ³ газа без ввода газов рециркуляции и влаги в ЗАГ, V_T^0	$\text{м}^3 / \text{м}^3$	$V_T = \beta_{\text{сг}} \cdot V_T^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{\text{ЗАГ}} - \beta_{\text{сг}}) \cdot V_B^0$	11,337	11,113	7,385
Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м ³ газа при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, $V_T^{R,g}$	$\text{м}^3 / \text{м}^3$	Формула (4.28)	11,915	11,903	7,953
Высота зоны активного горения с учетом ввода газов рециркуляции и влаги $h_{\text{ЗАГ}}$	м	$h_{\text{ЗАГ}} = h_{\text{ЗАГ}}^0 \frac{V_T^{R,g}}{V_T}$	11,04	11,25	8,89
Поверхность расположенных в зоне активного горения:					
фронтальных экранов $F_{\text{ф}}$	м^2	$F_{\text{ф}} = a_T \cdot h_{\text{ЗАГ}}$	228,09	232,43	183,67
задних экранов	м^2	$F_{\text{з}} = a_T \cdot h_{\text{ЗАГ}}$	228,09	232,43	183,67

F_3					
боковых экранов F_6	m^2	$F_6 = b_T \cdot h_{3AG}$	113,27	115,43	91,21
горелок F_T	m^2	$F_T = n_T \cdot (\pi/4) \cdot D_a^2$	63,61	63,61	53,01
сечений, ограничивающих зону активного горения сверху и снизу, $F_{верх}$ и $F_{ниж}$	m^2	$F_{верх} = F_{ниж} = a_T \cdot b_T$	211,97	211,97	211,97
Площадь поверхностей, расположенных ниже ЗАГ, (см. рисунок П.2.1):					
фронтных экранов F_Φ^H	m^2	$F_\Phi^H = 1,35 \cdot a_T$	27,89	27,89	27,89
задних экранов F_3^H	m^2	$F_3^H = 1,35 \cdot a_T$	27,89	27,89	27,89
боковых экранов F_6^H	m^2	$F_6^H = 1,35 \cdot b_T$	13,85	13,85	13,85
пода F_Π	m^2	$F_\Pi = a_T \cdot b_T$	211,97	211,97	211,97
Коэффициент тепловой эффективности настенных экранов ψ_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, ψ_Π	-	То же	0,1	0,1	0,1
Коэффициент, характеризующий отдачу тепла излучением в вышерасположенную зону, ψ'	-	Согласно рекомендациям "Теплового расчета котельных агрегатов (нормативный метод)". - СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,1	0,1	0,1
Коэффициент, характеризующий отдачу тепла в сторону пода, ψ''	-	$\psi'' = \frac{F_\Phi^H \psi_\Phi + 2 \cdot F_6^H \psi_6 + F_3^H \psi_3 + F_\Pi \psi_\Pi}{F_\Phi^H + 2 \cdot F_6^H + F_3^H + F_\Pi}$	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	$\bar{T}_{ЗАГ} = T_{зд}' \cdot (1 - \psi_{ЗАГ})^{0,25}$	1979	1916	1916
Полная поверхность зоны активного горения $f_{ЗАГ}$	м ²	$f_{ЗАГ} = 2 \cdot a_T \cdot b_T + 2(a_T + b_T) \cdot h_{ЗАГ}$	1106,66	1119,64	973,70
Теплонапряжение зоны активного горения $q_{ЗАГ}$	МВт/м ²	$q_{ЗАГ} = \frac{B_p (\beta_{ст} Q_{ст}^r + Q_{ш} + Q_{ф} + Q_{в} + Q_{гр} + Q_{вл})}{f_{ЗАГ}}$	2,014	1,912	1,440
Отраженный поток в зоне активного горения $q_{ЗАГ}^{отр}$	МВт/м ²	$q_{ЗАГ}^{отр} = q_{ЗАГ} \cdot (1 - \psi_{ЗАГ})$	1,144	1,082	0,851
Коэффициент заполнения топочной камеры ξ	-	П.4.21	0,8	0,8	0,8
Время пребывания продуктов сгорания ЗАГ $\tau_{ЗАГ}$	с	$\tau_{ЗАГ} = \frac{a_T \cdot b_T \cdot h_{ЗАГ}}{B_p \cdot V_{г}^{R,г} \cdot (\bar{T}_{ЗАГ} / 273)} \cdot \xi$	0,388	0,409	0,483
Массовая концентрация оксидов азота NO_2^M в пересчете на NO_2 во влажных продуктах сгорания при $\alpha_{ЗАГ}$	г/м ³	Формула (4.1)	1,084	0,859	0,824 ($\alpha_{ЗАГ}=0,7$)
Теоретический объем образовавшихся сухих газов (при $\alpha = 1,0$) $V_{ст}^0$	м ³ /м ³	$V_{ст}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0$	8,53	8,53	8,53
Массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 и стандартные условия (сухие газы,	г/м ³	Формула (4.30)	0,988	0,771	0,494

$\alpha = 1,4$ $\text{NO}_2^{\text{ст.у}}$					
--	--	--	--	--	--

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

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

$$V_{\text{B}}^{\text{д}} = 0,67 \cdot V_{\text{B}}^{\text{д}} + 0,33 \cdot V_{\text{B}}^{\text{д}}, \quad (\text{П.2.1})$$

где $0,67 \cdot V_{\text{B}}^{\text{д}}$ - объем воздуха, подаваемого в первые два яруса горелок; $0,33 \cdot V_{\text{B}}^{\text{д}}$ - объем воздуха, подаваемого в третий ярус горелок.

Коэффициент избытка воздуха определяется как

$$\alpha = V_{\text{B}}^{\text{д}} / V_{\text{B}}^0, \quad (\text{П.2.2})$$

где V_{B}^0 - теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ($\alpha = 1$).

Коэффициент избытка воздуха в двух первых ярусах горелок

$$\alpha_{\Gamma} = (0,67 \cdot V_{\text{B}}^{\text{д}}) / V_{\text{B}}^0, \quad (\text{П.2.3})$$

где $V_{\text{B}}^0 = V_{\text{B}}^{\text{д}} / 1,05$ (исходя из условия $\alpha_{\Gamma} = 1,05$).

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.

Текст документа сверен по:
/ Минэнерго РФ; РАО "ЕЭС России". -
М.: ОАО "ВТИ", 2005

СО 153-34.02.304-2003 Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций

Вид документа:

Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 N 286

СО от 30.06.2003 N 153-34.02.304-2003

Нормативные документы, принимаемые отраслевыми министерствами

Принявший орган: Минэнерго России

Статус: Действующий


Тип документа: Нормативно-технический документ

Дата начала действия: 01.07.2003

Опубликован: / Минэнерго РФ; РАО "ЕЭС России". - М.: ОАО "ВТИ", 2005 год

Ссылается на

На него ссылаются

 Об утверждении и введении в действие Перечня нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

Приказ Ростехнадзора от 01.08.2006 N 738


П от 01.08.2006 N 01-01-2006

N П-01-01-2006

 Перечень документов по расчету выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферный воздух, действующих в 2001-2002 годах

Приказ МПР России от 25.04.2001

Нормативные документы, принимаемые отраслевыми министерствами

 РД 153-34.0-04.202-98 Методические указания. Аттестация подразделений энергетических предприятий, выполняющих количественный химический анализ. Организация и порядок проведения (старая редакция)

РД от 16.03.1998 N 153-34.0-04.202-98

СО от 16.03.1998 N 34.04.202-98

Приказ Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" от 16.03.1998

Нормативные документы, принимаемые отраслевыми министерствами

Тематики

Нормирование в области охраны окружающей среды

Контроль за утилизацией отходов. Сбросы и выбросы загрязняющих веществ

Качество воздуха (13.040)

Горелки. Котлы (27.060)

Охрана окружающей среды, защита человека от воздействия окружающей среды. Безопасность (13)

Энергетика и теплотехника (27)

Горелки и котлы в целом (27.060.01)

Выбросы стационарных источников (13.040.40)