

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

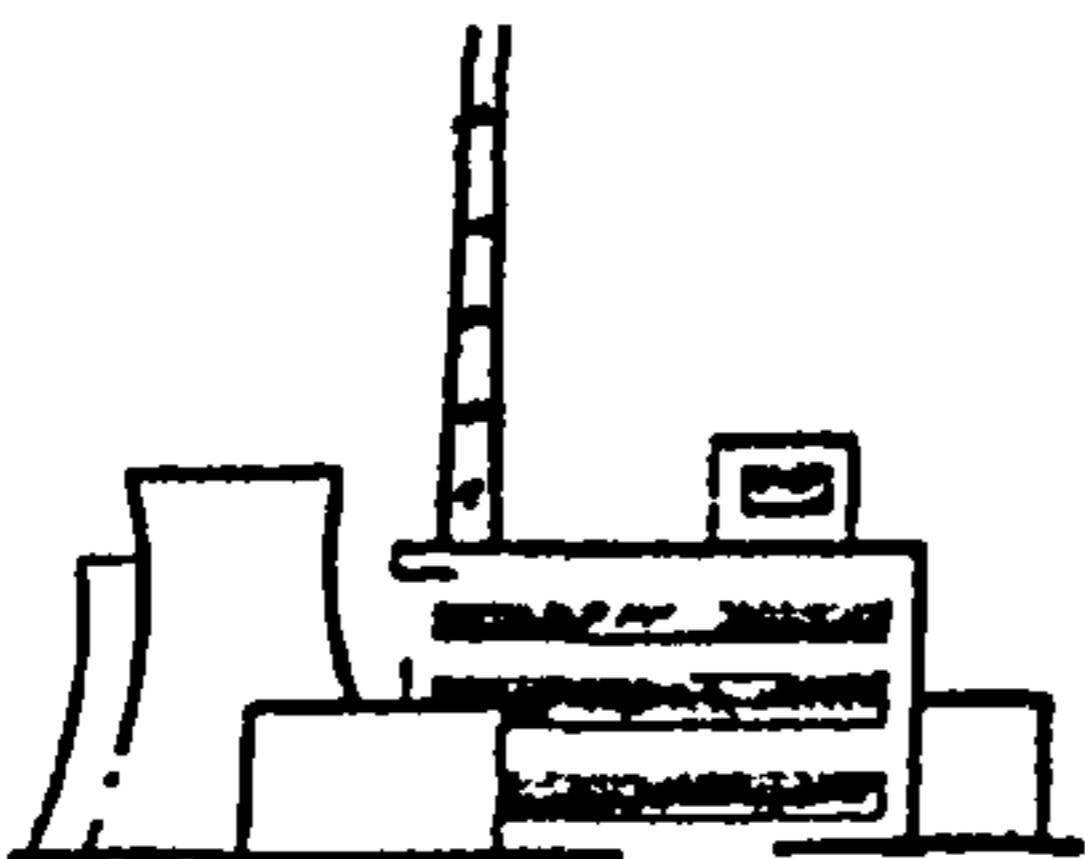
Москва

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

ОАО «ВТИ»
Москва 2005

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 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 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_{NO} и M_{NO_2} – молярные массы NO и NO₂, 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 ($0\text{ }^\circ\text{C}$, $p_0 = 760\text{ мм рт. ст.} = 101,3\text{ кПа}$), для чего используется следующее выражение:

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

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

2.3 Связь между объемными (ppm) и массовыми (г/м^3) 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); ϑ_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 ($0\text{ }^\circ\text{C}$; 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*¹⁾, в качестве которых приняты следующие: $\alpha_{yx} = 1,4$ в сухих дымовых газах при нормальных условиях [0 °С и 101,3 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 ($C^{ст.у}$) для сухих газов:

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

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

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

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

$$C_m^{ст.у.} = C_m \cdot \frac{273 + \vartheta_r}{273} \cdot \frac{p_0}{p_r} \cdot \frac{V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0}{V_{сг}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_B^0}, \quad (2.8)$$

где α – расчетный или опытный коэффициент избытка воздуха в сечении отбора газовой пробы; V_B^0 , V_r^0 – теоретические объемы соответственно воздуха и влажных газов; $V_{сг}^0 = V_r^0 - V_{H_2O}^0$ – теоретический объем сухих газов.

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

2.5 Значения V_B^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)

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

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

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

где $C^r, S_{ор+к}^r, H^r, O^r, N^r$ – 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 (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/м³) представляет собой количество вредного вещества в граммах, образовавшегося при сжигании 1 кг (или м³) топлива:

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

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/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:

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

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_{NO_2} – массовая концентрация NO₂ при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт. ст.), г/м³; V_r – объем дымовых газов, м³/кг (м³/м³), определяемый следующим образом:

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

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

$$V_{cr}^0 = V_r^0 - V_{H_2O}^0 , \quad (2.26)$$

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 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} – выход летучих на горючую массу, %.
- α_r – 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.
- $\Delta\alpha_{сбр}$ – сбросной воздух (сушильный агент) при транспорте пыли к горелкам горячим воздухом.
- $T_{ЗАГ}^*$ – 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 $K_{NO_2}^{тпл}$ и воздушных $K_{NO_2}^{взд}$ оксидов азота:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{пл} + K_{NO_2}^{взд} \quad (3.1)$$

3.3 Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO_2}^{пл} = 0,12 \cdot \xi_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_r} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{см}, \quad (3.2)$$

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: $FR = C^{св}/V^r$, где $C^{св} = 100 - W^r - A^r - V^r$; 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 $\beta_{\alpha_r}^{вхр}$	$(0,35 \cdot \alpha_r + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
Влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha_r}^{прм}$	$(0,53 \cdot \alpha_r + 0,12)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
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 β_{ϑ}	$0,11 \cdot \sqrt[3]{T_{3AG}'' - 1100}$	$1250 \text{ K} \leq T_{3AG}'' \leq 2050 \text{ K}$
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 $K_{\text{NO}_2}^{\text{пл}}$, 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, $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$ 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:

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

где $\alpha_{\text{ЗАГ}}''$ – 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.

$$\alpha_{\text{ЗАГ}}'' = \alpha_{\text{Г}} + \frac{1}{2} \Delta \alpha_{\text{Г}}; \quad (3.5)$$

$T_{\text{ЗАГ}}''$ – температура на выходе из зоны активного горения, К.

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

Температуру на выходе из зоны активного горения $T_{\text{ЗАГ}}''$ рассчитывают в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

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

$$\vartheta_{\text{ЗАГ}}'' = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \beta_{\text{сг}}^{\text{ЗАГ}} \cdot Q_i^{\text{Г}} + Q_{\text{в}} + i_{\text{тл}}}{(Vc)_{\text{Г}}} - \frac{2,05 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_{\text{Г}} \cdot (T_{\text{ЗАГ}}'')^4 \psi F}{B_{\text{р}} \cdot (Vc)_{\text{Г}}}, \quad (3.6)$$

где $Q_{\text{в}}$ – теплосодержание воздуха, поступающего через горелки, МДж/кг; $(Vc)_{\text{Г}}$ – 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; ψF – произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону активного горения, м²; $\epsilon_{\text{т}}$ – 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, δ	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;
- $h_{яp}$ – 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*
- 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_T – количество горелок;
- d_3 – 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/м³);
- N^r – содержание азота в топливе на рабочую массу %;
- V_B^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при $\alpha = 1,0$, м³/кг (м³/м³);
- V_r^0 – объем продуктов сгорания, образовавшихся при стехиометрическом ($\alpha = 1,0$) сжигании топлива, м³/кг (м³/м³);
- V_{RO_2} – объем трехатомных газов, полученных при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м³/кг (м³/м³);
- $V_{N_2}^0$ – теоретический объем азота, полученный при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м³/кг (м³/м³);

в) режимные параметры

- B_p – расчетный расход топлива, кг/с (м³/с); при наличии двусветного экрана B_p принимается на одну ячейку;
- $t_{тл}$ – температура топлива (при сжигании мазута), °С;
- g_{ϕ} – удельный расход форсуночного пара, идущего на распыл мазута, кг пара / кг мазута;
- t_{ϕ} – температура пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, °С;
- p_{ϕ} – давление пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, МПа;

$t_{гв}$	– температура горячего воздуха, °С;
α_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);
$t_{гр}$	– 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;
δ	– доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения при двухступенчатом сжигании (0–0,35).

4.2 Массовая концентрация оксидов азота (в пересчете на NO₂) во влажных продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха в зоне активного горения (г/м³) для нормальных условий (0 °С, 101,3 кПа или 760 мм рт. ст.) определяется по формулам:

при сжигании газа:

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

при сжигании мазута:

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

где $\bar{T}_{ЗАГ}$ – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения, К; $q_{ЗАГ}^{отр}$ – отраженный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м²; $\alpha_{ЗАГ}$ – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения; $\tau_{ЗАГ}$ – время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения, с; $K_{Г}$ – коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, определяемый по таблице 4.1; $\Delta NO_2^{тпл}$ – член, учитывающий количество топливных оксидов азота при превышении содержания азота в составе мазута 0,3 %, рассчитываемый как:

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

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:

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

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/м³); K_R – коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3; $V_{\text{в}}^0$ 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 газотока на рециркуляцию.

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

Топливо	$\alpha_{ЗАГ}$												
	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 щлицы 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 $Q_{тл} = 0$), МДж/кг:

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

Теплоемкость мазута, МДж/(кг·°С)

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

где $t_{тл}$ – 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_{ϕ} – удельный расход пара через форсунку на 1 кг мазута, кг/кг; i_{ϕ} – 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, g_{ϕ} при номинальной нагрузке равен $0,03-0,05$ кг/кг мазута.

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

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

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 $\alpha_{\text{ЗАГ}}$:

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

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

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

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

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

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

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

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, 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, $\psi' = 0,2$.

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

- если под не включен в объем ЗАГ:

$$\psi'' = \frac{F_{ф}^н \cdot \psi_{ф} + 2 \cdot F_{б}^н \cdot \psi_{б} + F_{з}^н \cdot \psi_{з} + F_{п} \cdot \psi_{п}}{F_{ф}^н + 2 \cdot F_{б}^н + F_{з}^н + F_{п}}, \quad (4.20)$$

где $F_{ф}^н$, $F_{б}^н$, $F_{з}^н$, $F_{п}$ – соответственно площади фронтного, боковых, и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода, м² (см. схемы на рисунке 4.1); $\psi_{ф}$, $\psi_{б}$, $\psi_{з}$, $\psi_{п}$ – соответственно тепловая эффективность

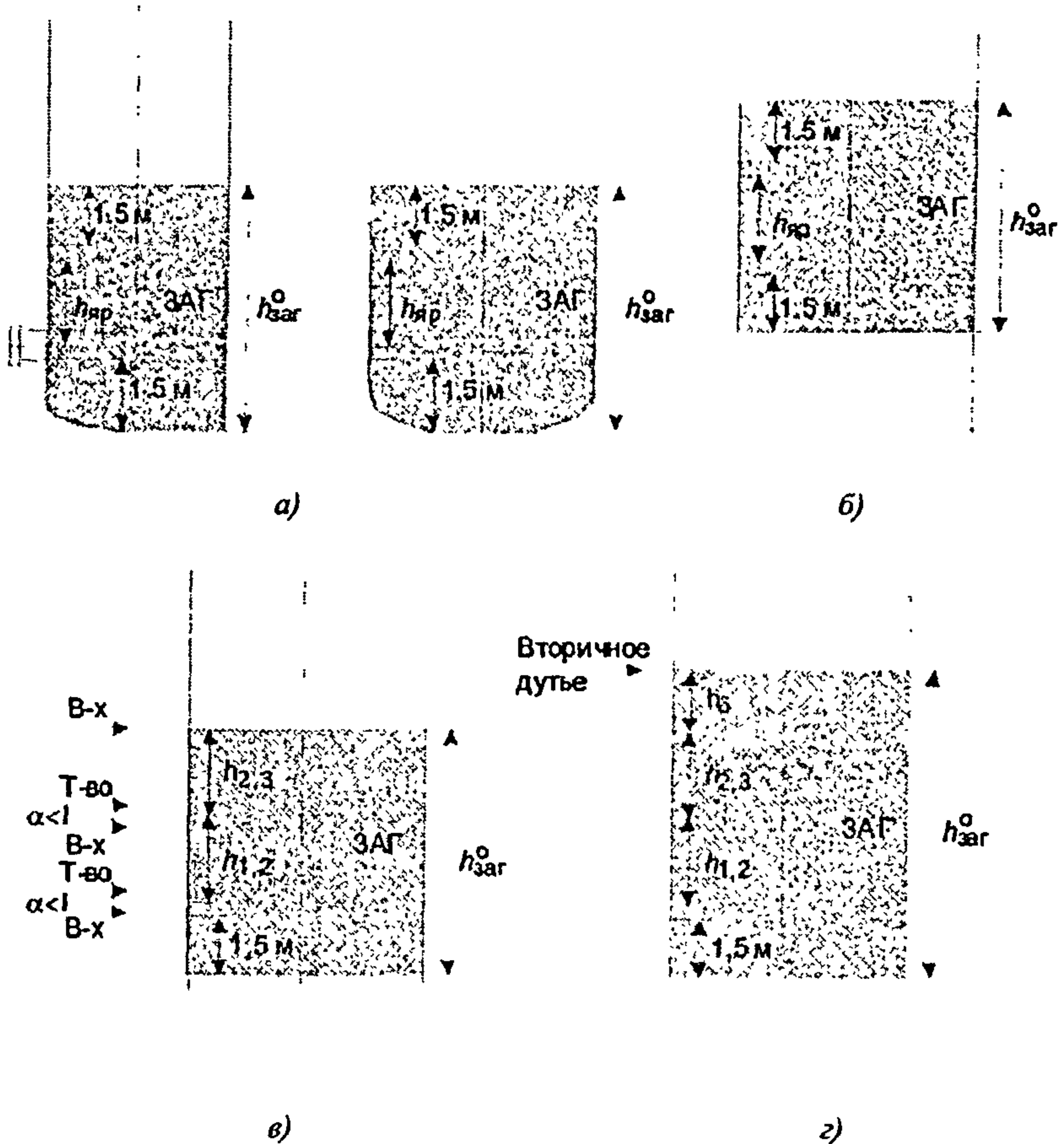
фронтального, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода;

- если под включен в объем ЗАГ:

$$\psi'' = \psi_n \quad (4.21)$$

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

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



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/м²,

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

где B_p – расчетный расход топлива, кг/с (м³/с), (при наличии в топке двухцветного экрана B_p принимается на одну ячейку).

4.17 Полная поверхность зоны активного горения, м²,

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

где a_T , b_T – соответственно ширина фронта и глубина топочной камеры, м, [при наличии в топке двухцветных экранов принимается ширина одной ячейки $a_T^* = a_T / (Z_3 + 1)$, Z_3 – число двухцветных экранов].

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

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

где $h_{ЗАГ}^0$ – 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 м³ газообразного) топлива в ЗАГ, м³/кг (м³/м³); $V_r^{R,g}$ – 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 $h_{ЗАГ}^0$ определяется из геометрических характеристик топки (см. схемы на рисунке 4.1):

- при обычном сжигании

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

- при ступенчатом сжигании

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

где $h_{яp_i}$ – расстояние между осями горелок по высоте между ярусами, м; n – количество ярусов; h_{δ} – 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 $h_{ЗАГ}^0 = 7,5$ м, а горелок мощностью от 96 до 160 МВт $h_{ЗАГ}^0 = 10$ м. При двухступенчатом сжигании $h_{ЗАГ}^0$ 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):

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

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):

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

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

$$\tau_{\text{ЗАГ}} = \frac{a_{\Gamma} \cdot b_{\Gamma} \cdot h_{\text{ЗАГ}}}{B_p \cdot V_{\Gamma}^{R,g} \cdot \left(\frac{T_{\text{ЗАГ}}}{273} \right)} \cdot \xi, \quad (4.29)$$

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:

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

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

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

где $B_{\text{р}_i}$ – расчетный расход газа или мазута, $\text{м}^3/\text{с}$ (кг/с); $(Q_i^{\text{р}})_i$ – теплота сгорания газа или мазута, МДж/м^3 (МДж/кг); $B_{\text{р}_y}$ и $(Q_i^{\text{р}})_y$ – 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:

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

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

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); $(Q_i^{\text{р}})_{\text{м}}$ – 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:

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

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

где x – количество газа на 1 кг твердого топлива, м³/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

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

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	Нерюн-ринский 3СС	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^{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 , %	$(100 W^r - A^r)/100$	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 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	Прямоточные	Прямоточные	Прямоточные	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые	Вихревые/прямоточные
Коэффициент избытка воздуха в горелках α_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 α_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 топков 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 Δa_{T}	То же	0,1	0,1	0,1	0,02	0,1	0,1	0,02	0,1
Третичное дутье a_{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 $\alpha_{\text{ЗАГ}}^*$	$\alpha_{\text{T}} + 0,5 \cdot \Delta a_{\text{T}}$	1,15	1,17	1,00	1,21	1,15	1,15	1,11	$\frac{1,05}{0,92}$

Влияние α_T на образование топливных оксидов азота β_{α_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 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 азота β_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 $T_{ЗАГ}^*$ на образование топливных оксидов азота $\beta_{T_{ЗАГ}^*}$	$0,11 \cdot (T_{ЗАГ}^* - 1100)^{0,33}$	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	$\frac{1,34}{1,49}$

Окончание приложения 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удельный выброс топливных оксидов азота $K_{NO_2}^{тпл}$, г/МДж	$0,12 \cdot \xi_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha T} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \times$ $\times \beta_{T_{3AG}} \cdot \beta_{см}$	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	$K_{NO_2}^{тпл} + K_{NO_2}^{взд}$	0,135	0,317	0,209	0,379	0,536	0,652	0,331	$\frac{0,57}{0,36}$
Теоретический объем газов $V_{г}^0$, 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 $V_{в}^0$, 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		$V_{г}^0 + (1,4-1) \cdot V_{в}^0 -$ $- V_{H_2O}^0$	5,92	6,68	6,68	5,39	8,43	8,15	8,21

Концентрация 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 ³	$K_{\text{NO}_2} \cdot Q_i' / V_{\text{сг}}$	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_r (δ_m)	$(B \cdot Q_i')_i / \Sigma (B \cdot Q_i')_i$	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 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 ³	$C_{\text{NO}_2} \cdot A_i$	0,36	0,86	0,57	1,03	0,87	1,33	0,91	$\frac{1,14}{0,72}$

* Если $\alpha_{\text{ЗАГ}}^{\text{н}} < 1$, то $K_{\text{NO}_2}^{\text{взд}}$ 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, м³/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.

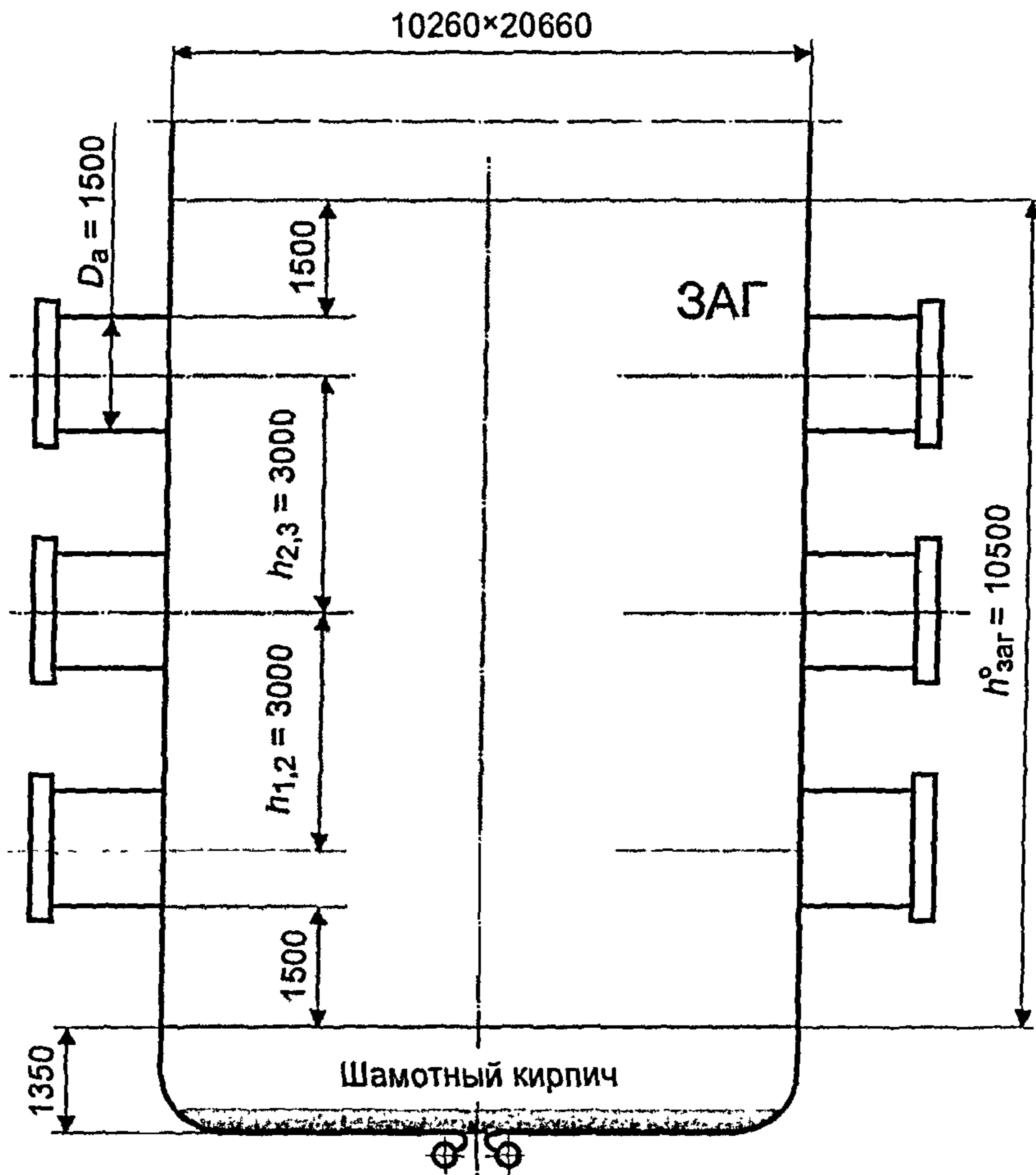


Рис. П.2.1 – Схема ЗАГ котла ТГМП-204ХЛ

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

Определяемая величина	Размерность	Формула или обоснование	Вариант 1	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
<i>Конструктивные параметры</i>					
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 x		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 ³	Исходные данные	35,3	35,3	35,3
Теоретический объем воздуха, необходимого для полного сжигания топлива, V_B^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_r^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 $V_{N_2}^0$	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 $\Delta\alpha_T$	—	— " —	0	0	0
Температура горячего воздуха $t_{гв}$	°С	— " —	360	360	360
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

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 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 $G_{вл}/G_{тпл}$ (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	$g = (G_{вл}/G_{тпл}) \rho_{г}^0$	–	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 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, $Q_{в}$	МДж/м ³	$Q_{в} = \alpha_{\Gamma} \cdot I_{в}^0 + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{\Gamma} \cdot I_{хв}^0$	4,995	4,863	3,242
Присосы холодного воздуха в водяном экономайзере $\Delta\alpha_{вэ}$ (два пакета)	–	Опускной газодход газоплотный; $\Delta\alpha_{вэ}$ 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 газодохода на рециркуляцию $\alpha_{отб}$	–	$\alpha_{отб} = \alpha_{вэ1}^* = \alpha_{\Gamma}^* + \Delta\alpha_{вэ}$	1,09	1,07	1,07
Энтальпия газов рециркуляции $I_{гр}$	МДж/м ³	$I_{гр} = I_{гр}^0 + (\alpha_{отб} - 1) \cdot I_{в}^0$	6,378	6,278	6,278
Тепло, вносимое в зону активного горения с рециркулирующими газами, $Q_{гр}$	МДж/м ³	$Q_{гр} = K_R \cdot R \cdot I_{гр}$	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 $\alpha_{ЗАГ}$	–	$\alpha_{ЗАГ} = \alpha_{Г} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_{Г}$	1,07	1,05	0,7
Степень выгорания топлива в зоне активного горения $\beta_{сг}$	–	Таблица 4.2	0,98	0,95	0,609
<i>1-е приближение</i>					
Ожидаемая адиабатная температура $T_{ад}$	К	Принимается	2270	2200	2150
Ожидаемая адиабатная температура $\vartheta_{ад}$	°С	$T_{ад} - 273$	1997	1927	1877
Температурный коэффициент k_t	–	$k_t = (\vartheta_{ад} - 1200) / 1000$	0,797	0,727	0,677
Средняя теплоемкость продуктов сгорания c_r	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.15)	$1,677 \times 10^{-3}$	$1,667 \times 10^{-3}$	$1,661 \times 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха c_b	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.17)	$1,533 \times 10^{-3}$	$1,527 \times 10^{-3}$	$1,522 \times 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{вл}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	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	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.15)	$1,678 \cdot 10^{-3}$	$1,668 \cdot 10^{-3}$	$1,665 \cdot 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха c_b	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	Формула (4.17)	$1,534 \cdot 10^{-3}$	$1,528 \cdot 10^{-3}$	$1,526 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{вл}$	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}}$	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 ³ газа без ввода газов рециркуляции и влаги в ЗАГ, V_r	м ³ /м ³	$V_r = \beta_{сг} \cdot V_r^0 + 1,0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) V_b^0$	11,337	11,113	7,385

1	2	3	4	5	6
Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м ³ газа при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, $V_{\Gamma}^{R,g}$	м ³ /м ³	Формула (4.28)	11,915	11,903	7,953
Высота зоны активного горения с учетом ввода газов рециркуляции и влаги $h_{ЗАГ}$	м	$h_{ЗАГ} = h_{ЗАГ}^0 \frac{V_{\Gamma}^{R,g}}{V_{\Gamma}}$	11,04	11,25	8,89
Поверхность расположенных в зоне активного горения:					
фронтальных экранов F_{Φ}	м ²	$F_{\Phi} = a_{\Gamma} \cdot h_{ЗАГ}$	228,09	232,43	183,67
задних экранов F_3	м ²	$F_3 = a_{\Gamma} \cdot h_{ЗАГ}$	228,09	232,43	183,67
боковых экранов F_6	м ²	$F_6 = b_{\Gamma} \cdot h_{ЗАГ}$	113,27	115,43	91,21
горелок F_{Γ}	м ²	$F_{\Gamma} = n_{\Gamma} \cdot (\pi/4) \cdot D_a^2$	63,61	63,61	53,01
сечений, ограничивающих зону активного горения сверху и снизу, $F_{верх}$ и $F_{ниж}$	м ²	$F_{верх} = F_{ниж} = a_{\Gamma} \cdot b_{\Gamma}$	211,97	211,97	211,97
Площадь поверхностей, расположенных ниже ЗАГ, (см. рисунок П.2.1):					
фронтальных экранов F_{Φ}^H	м ²	$F_{\Phi}^H = 1,35 \cdot a_{\Gamma}$	27,89	27,89	27,89
задних экранов F_3^H	м ²	$F_3^H = 1,35 \cdot a_{\Gamma}$	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_{II}	m^2	$F_{II} = a_T \cdot b_T$	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_{II}	—	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''	—	$\psi'' = \frac{F_\phi^H \psi_\phi + 2 \cdot F_6^H \psi_6 + F_3^H \psi_3 + F_{II} \psi_{II}}{F_\phi^H + 2 \cdot F_6^H + F_3^H + F_{II}}$	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 $f_{ЗАГ}$	m^2	$f_{ЗАГ} = 2 \cdot a_T \cdot b_T + 2 \cdot (a_T + b_T) \cdot h_{ЗАГ}$	1106,66	1119,64	973,70

1	2	3	4	5	6
Теплонапряжение зоны активного горения $q_{ЗАГ}$	МВт/м ²	$q_{ЗАГ} = \frac{B_p (\beta_{сг} Q_i' + Q_{тл} + Q_{ф} + Q_{с} + Q_{гр} + Q_{ал})}{f_{ЗАГ}}$	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 в ЗАГ $\tau_{ЗАГ}$	с	$\tau_{ЗАГ} = \frac{a_T \cdot b_T \cdot h_{ЗАГ}}{B_p \cdot V_{г}^{R,g} \cdot \left(\frac{T_{ЗАГ}}{273}\right)} \cdot \xi$	0,388	0,409	0,483
Массовая концентрация оксидов азота $NO_2^м$ 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 $\alpha = 1,0$) $V_{сг}^0$	м ³ /м ³	$V_{сг}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0$	8,53	8,53	8,53
Массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 и стандартные условия (сухие газы, $\alpha = 1,4$) $NO_2^{ст.у}$	г/м ³	Формула (4.30)	0,988	0,771	0,494

Содержание

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



ВТИ

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

Подписано в печать 21.02.05. Формат 60×90¹/₁₆.
Печ. л. 2,75. Тираж 350 экз. Заказ № 61 .

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