Текст документа сверен

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

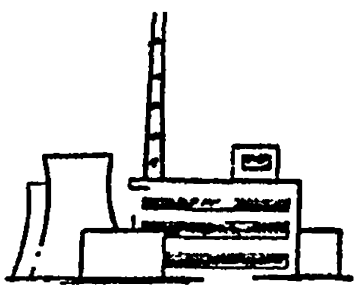
Москва
Центр производственно-технической информации
энергопредприятий и технического обучения ОРГРЭС

gost.e-ecolog.ru

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.* [ГОУПВПО 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.

© ОАО «ВТИ», 2005

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 раздельными 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):

$$M_{NO_2} = 0{,}8 \cdot M_{NO_x}; \qquad (1.1)$$

$$M_{NO} = (1-0{,}8) \cdot M_{NO_x} \cdot \frac{\mu_{NO}}{\mu_{NO_2}} = 0{,}13 \cdot M_{NO_x}, \qquad (1.2)$$

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:

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

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 °С, p_0 = 760 мм рт. ст. = 101,3 кПа), для чего используется следующее выражение:

$$C_m^{\text{ну}} = C_m^{\text{оп}} \cdot \frac{273+\vartheta_\text{г}}{273} \cdot \frac{p_0}{p_\text{г}}, \qquad (2.2)$$

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

2.3 Связь между объемными (ppm) и массовыми (г/м^3) концентрациями устанавливается следующим соотношением:

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

где k_i – коэффициент пересчета, равный

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

M_i – молярная масса i-го вещества, г; V_{M_i} – его молярный объем, л (в качестве первого приближения за V_{M_i} может быть принят объем идеального газа, равный 22,41 л); $\vartheta_\text{г}$ – температура и $p_\text{г}$ – 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*** [1], 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.)].

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 С, полученных для сухих газов, на стандартные условия ($C^{ст.у}$) для сухих газов:

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

$$C_m^{ст.у.} = C_m \cdot \frac{273 + \vartheta_г}{273} \cdot \frac{p_0}{p_г} \cdot \frac{V_{сг}^0 + (\alpha - 1) V_в^0}{V_{сг}^0 + (1{,}4 - 1) V_в^0}\ ; \qquad (2.6)$$

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

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

$$C_m^{ст\ у} = C_m \cdot \frac{273 + \vartheta_г}{273} \cdot \frac{p_0}{p_г} \cdot \frac{V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_в^0}{V_{сг}^0 + (1{,}4 - 1) \cdot V_в^0}\ , \qquad (2.8)$$

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

---

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

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

для твердого и жидкого топлива (м³/кг)

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

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

$$V_г^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = \\ = 1{,}866\frac{C^r + 0{,}375S_{op+к}^r}{100} + 0{,}79V^0 + 0{,}8\frac{N^r}{100} + V_{H_2O}^0 , \qquad (2.11)$$

где $C^r, S_{op+к}^r, H^r, O^r, N^r$ – 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 (м³/м³)

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

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

$$V_г^0 = 0{,}01[CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n] + 0{,}79V^0 + \frac{N_2}{100} + V_{H_2O}^0 , \qquad (2.14)$$

где CO, CO_2, H_2, H_2S, C_mH_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/м³.

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

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

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

$$m_{NO_2} = C_{NO_2} \cdot V_г \,. \qquad (2.15)$$

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

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

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

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:

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

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

2.9 Для пересчета указанных параметров используются следующие соотношения:

$$K_{NO_2} = C_{NO_2} \cdot V_г / Q_i^r\,; \qquad (2.18)$$

$$m_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot Q_i^r\,; \qquad (2.19)$$

$$M_{NO_2} = C_{NO_2} \cdot B_р \cdot V_г\,; \qquad (2.20)$$

$$M_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot B_р \cdot Q_i^r\,; \qquad (2.21)$$

$$M_{NO_2} = m_{NO_2} \cdot B_р\,, \qquad (2.22)$$

где C_{NO_2} – массовая концентрация NO_2 при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт. ст.), г/м^3; $V_г$ – объем дымовых газов, м^3/кг (м^3/м^3), определяемый следующим образом:

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

$$V_г = V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_в^0\,; \qquad (2.23)$$

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

$$V_г = V_{сг}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_в^0; \quad (2.24)$$

$$V_{сг}^0 = V_г^0 - V_{H_2O}^0, \quad (2.26)$$

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, %.
$\alpha_г$	– 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.
$B_р$	– 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:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{тпл} + K_{NO_2}^{взд} \ . \qquad (3.1)$$

3.3 Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO_2}^{тпл} = 0{,}12 \cdot \xi_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_г} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_\vartheta \cdot \beta_{см}, \qquad (3.2)$$

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

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

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 $\beta_{\alpha_г}^{вхр}$	$(0{,}35 \cdot \alpha_г + 0{,}4)^2$	$0{,}9 \le \alpha_г \le 1{,}3$
Влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha_г}^{прм}$	$(0{,}53 \cdot \alpha_г + 0{,}12)^2$	$0{,}9 \le \alpha_г \le 1{,}3$
Влияние доли первичного воздуха в горелке β_{α_1}	$1{,}73 \cdot \alpha_1 + 0{,}48$	$0{,}15 \le \alpha_1 \le 0{,}55$
Влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух (без учета снижения температуры в зоне активного горения) β_R	$1 - 0{,}016\sqrt{R}$	$(0 \le R \le 30)$ %
Влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота β_ϑ	$0{,}11 \cdot \sqrt[3]{T_{3АГ}'' - 1100}$	$1250 \text{ K} \le T_{3АГ}'' \le 2050 \text{ K}$
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\beta_{см}^{вхр}$	$0{,}4 \cdot (w_2/w_1)^2 + 0{,}32$	$1{,}0 \le w_2/w_1 \le 1{,}6$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\beta_{см}^{прм}$	$0{,}98 \cdot w_2/w_1 - 0{,}47$	$1{,}4 \le w_2/w_1 \le 4{,}0$

3.4 При подаче в горелки пыли высокой концентрации значение $K_{NO_2}^{тпл}$, 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:

$$K_{NO_2}^{взд} = \frac{1{,}54\cdot 10^{16}}{\sqrt{T''_{ЗАГ}}}\cdot\sqrt{\frac{\alpha''_{ЗАГ}-1}{\alpha''_{ЗАГ}}}\cdot\exp\left(-\frac{67000}{T''_{ЗАГ}}\right), \qquad (3.4)$$

где $\alpha''_{ЗАГ}$ – 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.

$$\alpha''_{ЗАГ} = \alpha_Г + \tfrac{1}{2}\Delta\alpha_Т; \qquad (3.5)$$

$T''_{ЗАГ}$ – температура на выходе из зоны активного горения, К.

Уравнение (3.4) справедливо в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $1{,}05 \le \alpha''_{ЗАГ} \le 1{,}4$ и до температуры $T''_{ЗАГ} = 2050$ К. При $T''_{ЗАГ} < 1800$ К значением $K_{NO_2}^{взд}$ можно пренебречь.

Температуру на выходе из зоны активного горения $T''_{ЗАГ}$ рассчитывают в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

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

$$\vartheta''_{ЗАГ} = \frac{\frac{100}{100-q_4}\beta_{сг}^{ЗАГ}\cdot Q_i^r + Q_в + i_{тл}}{(Vc)_Г} - \frac{2{,}05\cdot 10^{-10}\cdot\varepsilon_Т\cdot\left(T''_{ЗАГ}\right)^4\psi F}{B_р\cdot(Vc)_Г}, \qquad (3.6)$$

где $Q_в$ – теплосодержание воздуха, поступающего через горелки, МДж/кг; $(Vc)_Г$ – средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания

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

Приведенное уравнение решается методом последовательных приближений, т.к. в его правую часть входит $T''_{ЗАГ} = \vartheta''_{ЗАГ} + 273$. Если расчетное значение $\vartheta''_{ЗАГ}$ по формуле (3.6) будет более чем на 50 °С отличаться от предварительно выбранной величины $T''_{ЗАГ}(\vartheta''_{ЗАГ})$, то необходимо сделать второе приближение.

При наличии рециркуляции дымовых газов расчет $\vartheta''_{ЗАГ}$ 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, $D/D_{ном}$ 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 настоящим Методическим указаниям.

4.1 Исходные данные, необходимые для расчета:

а) конструктивные параметры

$a_т$ – ширина топки (в свету), м; при наличии двусветного экрана принимается ширина одной ячейки;

$b_т$ – глубина топки (в свету), м;

$h_{яр}$ – расстояние между осями соседних (по высоте) горелок, м; при неравенстве расстояний между ярусами (при $Z_{яр} \geq 3$) определяются расстояния между первым и вторым ярусами горелок $h_{1,2}$, вторым и третьим $h_{2,3}$ и т.д.;

$h_б$ – 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;

$D_а$ – диаметр амбразуры горелок, м;

$n_г$ – количество горелок;

$d_э$ – диаметр экранных труб поверхностей нагрева в топке, мм;

s – шаг экранных труб, мм;

$Z_э$ – 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 %;

$V_в^0$ – теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при $\alpha = 1{,}0$, м^3/кг (м^3/м^3);

$V_г^0$ – 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, м^3/кг (м^3/м^3);

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

в) режимные параметры

$B_р$ – расчетный расход топлива, кг/с (м^3/с); при наличии двусветного экрана $B_р$ принимается на одну ячейку;

$t_{тл}$ – температура топлива (при сжигании мазута), °С;

$g_ф$ – удельный расход форсуночного пара, идущего на распыл мазута, кг пара / кг мазута;

$t_ф$ – температура пара, поступающего в форсунку на распыл мазута, °С;

$p_ф$ – 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 NO_2) во влажных продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха в зоне активного горения (г/м^3) для нормальных условий (0 °С, 101,3 кПа или 760 мм рт. ст.) определяется по формулам:

при сжигании газа:

$$NO_2^г = 2{,}05\cdot10^{-3} K_Г \left[26{,}0\cdot\exp\left(0{,}26\cdot\frac{\overline{T}_{ЗАГ}-1700}{100}\right)-4{,}7\right]\times$$
$$\times\left[\exp\left(q_{ЗАГ}^{отр}\right)-1\right]\times\left[13{,}0-79{,}8\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}07)^4+18{,}1\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}07)^3+\right. \quad (4.1)$$
$$\left.+59{,}4\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}07)^2+9{,}6\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}07)\right]\cdot\tau_{ЗАГ};$$

при сжигании мазута:

$$NO_2^м = 2{,}05\cdot10^{-3} K_Г \left\{\left[24{,}3\cdot\exp\left(0{,}19\cdot\frac{\overline{T}_{ЗАГ}-1650}{100}\right)-12{,}3\right]\times\right.$$
$$\times\left[\exp\left(q_{ЗАГ}^{отр}\right)-1\right]\times\left[15{,}1-131{,}7\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}09)^4+72{,}3\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}09)^3+\right. \quad (4.2)$$
$$\left.\left.+73{,}0\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}09)^2+2{,}8\cdot(\alpha_{ЗАГ}-1{,}09)\right]\cdot\tau_{ЗАГ}+\Delta NO_2^{тпл}\right\},$$

где $\overline{T}_{ЗАГ}$ – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения, К; $q_{ЗАГ}^{отр}$ – отраженный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м^2; $\alpha_{ЗАГ}$ – 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:

$$\Delta NO_2^{тл} = \frac{650 \cdot (N^r - 0{,}3)}{V_г}, \qquad (4.3)$$

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

Таблица 4.1 – **Значения коэффициента $K_Г$ 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
Многопоточные горелки стадийного сжигания	0,65	0,7
Многопоточные 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):

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

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

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

$$T_{ад} = \left[\beta_{сг} \cdot Q_i^r + Q_{тл} + Q_ф + \alpha_Г \cdot I_в^0 + \Delta\alpha_Т \cdot I_{хв} + K_R \cdot R \cdot I_{гр} + g \cdot (i_{вл} - r)\right] / \\ / \left[\beta_{сг} \cdot V_г^0 \cdot c_г + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) V_в^0 \cdot c_в + 1{,}24 \cdot g \cdot c_{вл} + \right. \\ \left. + K_R \cdot R \cdot (V_г^0 \cdot c_г + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{отб} - 1) V_в^0 \cdot c_в + 1{,}24 \cdot g \cdot c_{вл})\right] + 273, \qquad (4.5)$$

где $\beta_{сг}$ – степень выгорания топлива в ЗАГ, определяемая по таблице 4.2 в зависимости от вида сжигаемого топлива; Q_i^r – теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м^3); K_R – коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице 4.3; $V_в^0$ и $V_г^0$ – соответственно теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания, м^3/кг (м^3/м^3); $\alpha_{отб}$ – коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода 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	≥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 $Q_{тл} = 0$), МДж/кг:

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

Теплоемкость мазута, МДж/(кг·°С)

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

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

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

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

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

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

4.7 Теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/кг (МДж/м^3):

$$Q_{в} = \alpha_{Г} \cdot I^{0}_{в} + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_{Т} \cdot I^{0}_{хв}, \qquad (4.9)$$

где $\alpha_Г = \alpha''_Т - \Delta\alpha_Т$ – избыток воздуха в горелке при наличии присосов воздуха в топку; $I^0_в$ и $I^0_{хв}$ – энтальпии теоретически необходимого количества воздуха при температуре горячего и холодного воздуха, МДж/кг (МДж/м^3).

4.8 Теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/кг (МДж/м^3)

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

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

$$I_{гр} = I^0_{гр} + (\alpha_{отб} - 1) \cdot I^0_в \ , \qquad (4.11)$$

где $\alpha_{отб}$ – коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода на рециркуляцию (обычно $\alpha_{отб} = \alpha''_{ВЭП}$); $I^0_{гр}$ и $I^0_в$ – соответственно энтальпии газов рециркуляции и теоретически необходимого количества воздуха при температуре газов рециркуляции (МДж/м^3), рассчитываемые в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов.

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

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

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

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

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

$$\alpha_{ЗАГ} = \alpha_Г + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_Т \ . \qquad (4.14)$$

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

при сжигании природного газа

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

при сжигании мазута

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

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)

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

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

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

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

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

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

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:

$$\psi'' = \frac{F_ф^н \cdot \psi_ф + 2 \cdot F_б^н \cdot \psi_б + F_з^н \cdot \psi_з + F_п \cdot \psi_п}{F_ф^н + 2 \cdot F_б^н + F_з^н + F_п}, \qquad (4.20)$$

где $F_ф^н$, $F_б^н$, $F_з^н$, $F_п$ – соответственно площади фронтового, 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

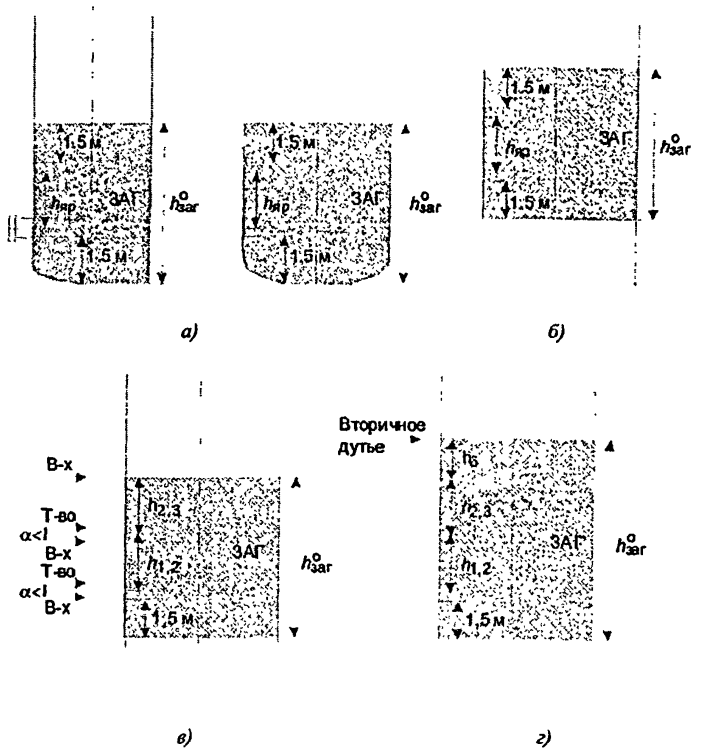
фронтового, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода;

- если под включен в объем ЗАГ:

$$\psi^{r}=\psi_{\text{п}} \ . \tag{4.21}$$

4.15 Отраженный поток в зоне активного горения $q_{\text{ЗАГ}}^{\text{отр}}$, МВт/м^2,

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



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

Рис. 4.1 – Схемы определения зоны активного горения

4.16 Теплонапряжение зоны активного горения, МВт/м^2,

$$q_{ЗАГ}=\frac{B_р\cdot\left(\beta_{сг}\cdot Q_i^r+Q_{тл}+Q_ф+Q_в+Q_{гр}+Q_{вл}\right)}{f_{ЗАГ}}, \qquad (4.23)$$

где $B_р$ – расчетный расход топлива, кг/с (м^3/с), (при наличии в топке двусветного экрана $B_р$ принимается на одну ячейку).

4.17 Полная поверхность зоны активного горения, м^2,

$$f_{ЗАГ}=2\cdot a_Т\cdot b_Т+2\cdot\left(a_Т+b_Т\right)h_{ЗАГ}, \qquad (4.24)$$

где $a_Т$, $b_Т$ – соответственно ширина фронта и глубина топочной камеры, м, [при наличии в топке двусветных экранов принимается ширина одной ячейки $a_Т^я=a_Т/\left(Z_э+1\right)$, $Z_э$ – число двусветных экранов].

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

$$h_{ЗАГ}=h_{ЗАГ}^0\frac{V_г^{R.g}}{V_г}, \qquad (4.25)$$

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

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

- при обычном сжигании

$$h_{ЗАГ}^0=\sum_{i=1}^{n}h_{яр_i}+D_а+3\ ; \qquad (4.26а)$$

- при ступенчатом сжигании

$$h_{ЗАГ}^0=\sum_{i=1}^{n}h_{яр_i}+h_δ+0{,}5\cdot D_а+1{,}5\ , \qquad (4.26б)$$

где $h_{яр_i}$ – 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; $D_а$ – 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, $V_г$, м³/кг (м³/м³):

$$V_г = \beta_{сг} \cdot V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) \cdot V_в^0 . \qquad (4.27)$$

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, $V_г^{R,g}$, м³/кг (м³/м³):

$$V_г^{R,g} = \beta_{сг} \cdot V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) \cdot V_в^0 + 1{,}24 \cdot g + K_R \cdot R \cdot \left[V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{отб} - 1) \cdot V_в^0 + 1{,}24 \cdot g \right]. \qquad (4.28)$$

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

$$\tau_{ЗАГ} = \frac{a_т \cdot b_т \cdot h_{ЗАГ}}{B_р \cdot V_г^{R,g} \cdot \left(\overline{T}_{ЗАГ} / 273 \right)} \cdot \xi , \qquad (4.29)$$

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:

$$NO_2^{ст.у} = NO_2^м \frac{V_г^{R,g}}{[V_{сг}^0 + (1{,}4 - 1) \cdot V_в^0] \cdot (1 + R)} . \qquad (4.30)$$

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:

$$A_г = 1 - \sqrt{\delta_г / 2{,}5} \ ; \qquad (5.1)$$

- при сжигании мазута вместе с углем:

$$A_м = 1 - \sqrt{\delta_м / 1{,}65} \ , \qquad (5.2)$$

где $\delta_г$ и $\delta_м$ – доли газа или мазута по теплу.

5.2.1 Доли газа и мазута по теплу рассчитывают по формуле

$$\delta_i = \frac{B_{p_i}(Q_i^r)_i}{B_{p_y}(Q_i^r)_y + B_{p_i}(Q_i^r)_i} \ , \qquad (5.3)$$

где B_{p_i} – расчетный расход газа или мазута, м^3/с (кг/с); $(Q_i^r)_i$ – теплота сгорания газа или мазута, МДж/м^3 (МДж/кг); B_{p_y} 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:

$$(V_{сг})_{см} = \delta_м (V_{сг})_м + (1 - \delta_м)(V_{сг})_y \ ; \qquad (5.4)$$

$$(Q_i^r)_{см} = \delta_м (Q_i^r)_м + (1 - \delta_м)(Q_i^r)_y \ , \qquad (5.5)$$

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

$$(V_{сг})_{см} = (V_{сг})_y + x(V_{сг})_г \ ; \qquad (5.6)$$

$$(Q_i^r)_{см} = (Q_i^r)_у + x(Q_i^r)_г, \qquad (5.7)$$

где x – количество газа на 1 кг твердого топлива, м^3/кг.

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

$$x = \frac{\delta_г}{\delta_у} \cdot \frac{(Q_i^r)_у}{(Q_i^r)_г} \qquad (5.8)$$

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. 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 $\alpha_г$	«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 $T''_{ЗАГ}$, 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 $\Delta\alpha_T$	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 $\alpha''_{ЗАГ}$	$\alpha_Г+0,5\cdot\Delta\alpha_T$	1,15	1,17	1,00	1,21	1,15	1,15	1,11	$\frac{1,05}{0,92}$

Влияние $\alpha_г$ на образование топливных оксидов азота $\beta_{\alpha_г}$	Для вихревой горелки $(0,35\cdot\alpha_г+0,4)^2$, для прямоточной горелки $(0,53\cdot\alpha_г+0,12)^2$	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	$0{,}12\cdot\xi_{NO_x}\cdot\beta_{\alpha_{ГВ}}\cdot\beta_{\alpha_1}\cdot\beta_R\times$ $\times\beta_{T''_{ЗАГ}}\cdot\beta_{см}$	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*	$1{,}54\cdot10^{16}\cdot[(\alpha''_{ЗАГ}-1)/$ $/\alpha''_{ЗАГ}]^{0,5}\cdot e^{-67000/T''_{ЗАГ}}$ $\times(T''_{ЗАГ})^{-0,5}$	0,000	0,001	0,000	0,019	0,179	0,252	0,012	$\frac{0{,}014}{0{,}000}$
Суммарный удельный выброс оксидов азота K_{NO_2}, г/МДж	$K_{NO_2}^{тпл}+K_{NO_2}^{взд}$	0,135	0,317	0,209	0,379	0,536	0,652	0,331	$\frac{0{,}57}{0{,}36}$
Теоретический объем газов $V_г^0$, м³/кг	«Тепловой расчет котлов (нормативный метод)» или эксплуатационные данные	5,03	5,35	5,35	4,25	6,6	6,25	6,39	5,17
Теоретический объем воздуха $V_в^0$, м³/кг		4,28	4,87	4,87	3,92	6,11	5,87	5,95	4,91
Объем водяных паров V_{H_2O}, м³/кг		0,82	0,62	0,62	0,43	0,61	0,45	0,56	0,30
Объем сухих дымовых газов $V_{сг}$ при н.у. и α=1,4, м³/кг	$V_г^0+(1{,}4-1)\cdot V_в^0-$ $-V_{H_2O}^0$	5,92	6,68	6,68	5,39	8,43	8,15	8,21	6,83

Концентрация NO_x в сухих *дымовых газах* при н.у. и α=1,4 без учета "подсветки" $C^{б/п}_{NO_2}$, г/м^3	$K_{NO_2} \cdot Q_i^r / V_{сг}$	0,36	0,86	0,57	1,03	1,47	1,77	0,91	$\frac{1,52}{0,95}$
Доля газа (мазута) по теплу $\delta_г$ ($\delta_м$)	$(B \cdot Q_i^r)_i / \sum (B \cdot Q_i^r)_i$	0	0	0	0	0,42 (газ)	0,10 (мазут)	0	$\frac{0,15}{\text{(газ)}}$
Поправочный коэффициент на "подсветку" A_i	При сжигании газа с углем $1-(\delta_г/2,5)^{0,5}$; при сжигании мазута с углем $1-(\delta_м/1,65)^{0,5}$	1	1	1	1	0,590	0,754	1	0,755
Концентрация NO_x в сухих дымовых газах при н.у. и α=1,4 с учетом "подсветки" угля газом (мазутом) $C^{п}_{NO_2}$, г/м^3	$C_{NO_2} \cdot A_i$	0,36	0,86	0,57	1,03	0,87	1,33	0,91	$\frac{1,14}{0,72}$

* Если $\alpha''_{ЗАГ} < 1$, то $K^{взд}_{NO_2}$ 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.

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, м^3/с, при равном количестве горелок в ярусах представляет собой сумму

$$V_в^д = 0,67 \cdot V_в^д + 0,33 \cdot V_в^д , \qquad (П.2.1)$$

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

Коэффициент избытка воздуха определяется как

$$\alpha = V_в^д / V_в^0 , \qquad (П.2.2)$$

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

Коэффициент избытка воздуха в двух первых ярусах горелок

$$\alpha_г = (0,67 \cdot V_в^д) / V_в^0 , \qquad (П.2.3)$$

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

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

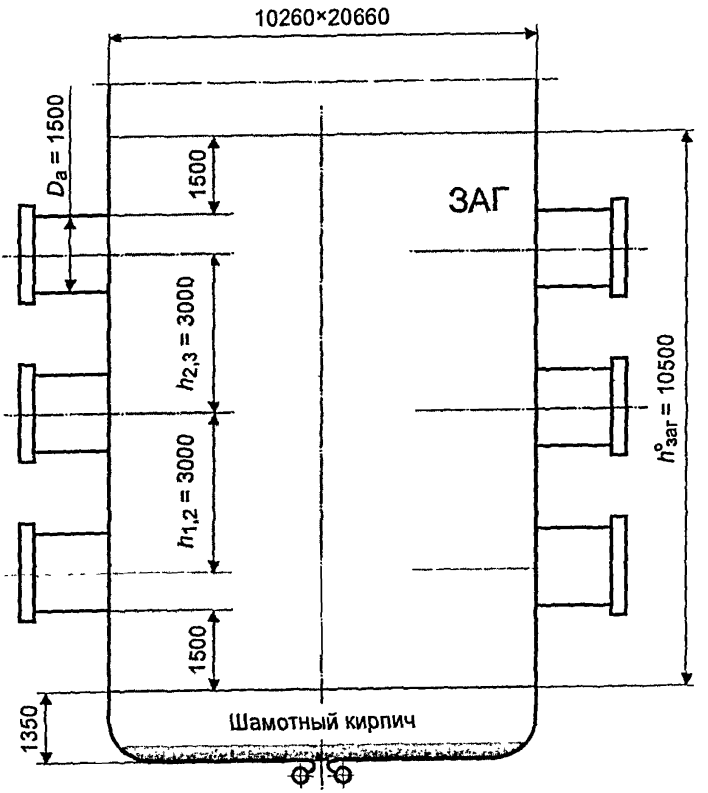


Рис. П.2.1 – Схема ЗАГ котла ТГМП-204ХЛ

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

Определяемая величина	Размерность	Формула или обоснование	Вариант 1 с вводом газов рециркуляции	Вариант 2 с вводом газов рециркуляции и впрыском воды	Вариант 3 двухступенчатое сжигание с вводом газов рециркуляции
1	2	3	4	5	6
Конструктивные параметры					
Ширина топки в свету $a_т$	м	Исходные данные	20,66	20,66	20,66
Глубина топки в свету $b_т$	м	То же	10,26	10,26	10,26
Диаметр амбразуры горелок $D_г$	м	–"–	1,5	1,5	1,5
Диаметр экранных труб $d_э$	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 $n_г$	–	–"–	36	36	24

Режимные параметры					
Теплота сгорания топлива Q_i^r	МДж/м^3	Исходные данные	35,3	35,3	35,3
Теоретический объем воздуха, необходимого для полного сжигания топлива, $V_в^0$	м^3/м^3	То же	9,52	9,52	9,52
Теоретический объем газов, образовавшихся при сжигании топлива при $\alpha = 1,0$, $V_г^0$	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 $B_р$	м^3/с	–"–	55,9	55,9	55,9
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки $\alpha_т^*$	–	–"–	1,07	1,05	1,05
Присосы холодного воздуха в топку $\Delta\alpha_т$	–	–"–	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

Продолжение таблицы П. 2.1

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 $I^0_{хв}$	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 $I^0_{гр}$ 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 $I^0_в(t_{гр})$ 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 $\rho^0_г$	кг/м^3	–"–	–	0,712	–
Водотопливное соотношение g	кг/м^3	$g=\left(G_{вл}/G_{тпл}\right)\rho^0_г$	–	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	–
Расчет					
Избыток воздуха в горелке $\alpha_Г$	–	$\alpha_Г = \alpha''_Т - \Delta\alpha_Т$	1,07	1,05	0,7
Коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, $K_Г$	–	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	$Q_в = \alpha_Г \cdot I^0_в + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_Т \cdot I^0_{хв}$	4,995	4,863	3,242
Присосы холодного воздуха в водяном экономайзере $\Delta\alpha_{ВЭ}$ (два пакета)	–	Опускной газоход 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 газохода на рециркуляцию $\alpha_{отб}$	–	$\alpha_{отб} = \alpha''_{ВЭ1} = \alpha''_Т + \Delta\alpha_{ВЭ}$	1,09	1,07	1,07
Энтальпия газов рециркуляции $I_{гр}$	МДж/м^3	$I_{гр} = I^0_{гр} + (\alpha_{отб} - 1) \cdot I^0_в$	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

Продолжение таблицы П.2.1

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 $\alpha_{ЗАГ}$	–	$\alpha_{ЗАГ} = \alpha_Г + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_Т$	1,07	1,05	0,7
Степень выгорания топлива в зоне активного горения $\beta_{сг}$	–	Таблица 4.2	0,98	0,95	0,609
1-е приближение					
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 $c_г$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	Формула (4.15)	$1{,}677 \times 10^{-3}$	$1{,}667 \times 10^{-3}$	$1{,}661 \times 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха $c_в$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	Формула (4.17)	$1{,}533 \times 10^{-3}$	$1{,}527 \times 10^{-3}$	$1{,}522 \times 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{вл}$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	Формула (4.18)	–	$1{,}952 \times 10^{-3}$	–

Адиабатная температура горения топлива $T_{ад}$	К	Формула (4.5)	2282	2210	2189
2-е приближение					
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 $c_г$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	Формула (4.15)	$1{,}678 \cdot 10^{-3}$	$1{,}668 \cdot 10^{-3}$	$1{,}665 \cdot 10^{-3}$
Средняя теплоемкость воздуха $c_в$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	Формула (4.17)	$1{,}534 \cdot 10^{-3}$	$1{,}528 \cdot 10^{-3}$	$1{,}526 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость водяных паров $c_{вл}$	$\frac{МДж}{м^3 \cdot °С}$	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 $h^0_{ЗАГ}$	м	Для обычного сжигания – ф-ла (4.26*а*); для ступенчатого сжигания – ф-ла (4.26*б*) (см. рисунки 4.1 и П.2.1)	10,5	10,5	8,25
Объем дымовых газов, образовавшихся при сжигании 1 м³ газа без ввода газов рециркуляции и влаги в ЗАГ, $V_г$	м³/м³	$V_г = \beta_{сг} \cdot V^0_г + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) V^0_в$	11,337	11,113	7,385

Продолжение таблицы П.2.1

1	2	3	4	5	6
Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газа при вводе в ЗАГ газов рециркуляции и влаги, $V_г^{R,g}$	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	$h_{ЗАГ}=h_{ЗАГ}^0\frac{V_г^{R,g}}{V_г}$	11,04	11,25	8,89
Поверхность расположенных в зоне активного горения:					
фронтовых экранов $F_ф$	м^2	$F_ф=a_Т\cdot h_{ЗАГ}$	228,09	232,43	183,67
задних экранов $F_з$	м^2	$F_з=a_Т\cdot h_{ЗАГ}$	228,09	232,43	183,67
боковых экранов $F_б$	м^2	$F_б=b_Т\cdot h_{ЗАГ}$	113,27	115,43	91,21
горелок $F_Г$	м^2	$F_Г=n_г\cdot(\pi/4)\cdot D_а^2$	63,61	63,61	53,01
сечений, ограничивающих зону активного горения сверху и снизу, $F_{верх}$ и $F_{ниж}$	м^2	$F_{верх}=F_{ниж}=a_Т\cdot b_Т$	211,97	211,97	211,97
Площадь поверхностей, расположенных ниже ЗАГ, (см. рисунок П.2.1):					
фронтовых экранов $F_ф^н$	м^2	$F_ф^н=1{,}35\cdot a_Т$	27,89	27,89	27,89
задних экранов $F_з^н$	м^2	$F_з^н=1{,}35\cdot a_Т$	27,89	27,89	27,89

боковых экранов $F_б^н$	м^2	$F_б^н = 1{,}35 \cdot b_т$	13,85	13,85	13,85
пода $F_п$	м^2	$F_п = a_т \cdot b_т$	211,97	211,97	211,97
Коэффициент тепловой эффективности настенных экранов $\psi_э$	–	Таблица 6.3, «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». – СПб.: ЦКТИ, 1998.	0,65	0,65	0,65
Коэффициент тепловой эффективности пода, закрытого шамотным кирпичом, $\psi_п$	–	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''	–	$\psi'' = \frac{F_ф^н \psi_ф + 2 \cdot F_б^н \psi_б + F_э^н \psi_э + F_п \psi_п}{F_ф^н + 2 \cdot F_б^н + F_э^н + F_п}$	0,255	0,255	0,255
Средняя тепловая эффективность поверхностей, ограничивающих ЗАГ, $\psi_{ЗАГ}$	–	$\psi_{ЗАГ} = \frac{\sum (\psi_i \cdot F_{ст_i}) + \psi' \cdot F_{верх} + \psi'' \cdot F_{низ}}{F_{ст} + F_{верх} + F_{низ}}$	0,432	0,434	0,409
Среднеинтегральная температура продуктов сгорания $\overline{T}_{ЗАГ}$	К	$\overline{T}_{ЗАГ} = T'_{ад} \cdot (1 - \psi_{ЗАГ})^{0,25}$	1979	1916	1916
Полная поверхность зоны активного горения $f_{ЗАГ}$	м^2	$f_{ЗАГ} = 2 \cdot a_т \cdot b_т + 2 \cdot (a_т + b_т) \cdot h_{ЗАГ}$	1106,66	1119,64	973,70

Окончание таблицы П. 2.1

1	2	3	4	5	6
Теплонапряжение зоны активного горения $q_{ЗАГ}$	МВт/м^2	$q_{ЗАГ}=\frac{B_р\left(\beta_{сг}Q_i^r+Q_{тл}+Q_ф+Q_в+Q_{гр}+Q_{вл}\right)}{f_{ЗАГ}}$	2,014	1,912	1,440
Отраженный поток в зоне активного горения $q_{ЗАГ}^{отр}$	МВт/м^2	$q_{ЗАГ}^{отр}=q_{ЗАГ}\cdot\left(1-\psi_{ЗАГ}\right)$	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	$\tau_{ЗАГ}=\frac{a_Т\cdot b_Т\cdot h_{ЗАГ}}{B_р\cdot V_г^{R,g}\cdot\left(\overline{T}_{ЗАГ}/273\right)}\cdot\xi$	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	$i_{сг}^0=V_{RO_2}+V_{N_2}^0$	8,53	8,53	8,53
Массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 и стандартные условия (сухие газы, $\alpha = 1,4$) $NO_2^{ст.у}$	г/м^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



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

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

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

gost.e-ecolog.ru