

Министерство тяжелого энергетического
и транспортного машиностроения СССР

Техуправление

Министерство газовой промышленности СССР

Техуправление

Министерство энергетики
и электрификации СССР

Главтехуправление

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ КОТЛОВ

РД 34.02.304-88

- РАЗРАБОТАНЫ** Всесоюзным дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехническим научно-исследовательским институтом им. Ф.Э.Дзержинского (ВТИ им. Ф.Э.Дзержинского), Научно-производственным объединением Центральный котло-турбинный институт им. И.И.Ползунова (НПО ЦКТИ), Среднеазиатским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института газовой промышленности (САФ ВНИИПромгаз), Харьковским филиалом ЦКБ ВО «Союзэнергоремонт»
- ИСПОЛНИТЕЛИ** В.И.Бабий, А.Д.Горбаненко, Ю.П.Енякин, В.Р.Котлер, Т.Б.Эфендиев (ВТИ им. Ф.Э.Дзержинского); Л.Н.Гусев, Н.Г.Жмерик, Н.С.Шестаков (НПО ЦКТИ); В.П.Васильев, П.А.Кадыров, Н.В.Тимошин, Л.М.Цирульников (САФ ВНИИПромгаз); М.М.Левин (ХФ ЦКБ СЭР)
- УТВЕРЖДЕНЫ** Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации Минэнерго СССР
«20» июля 1988 г.
Заместитель начальника *А.П.Берсенева*
Техническим управлением Министерства тяжелого энергетического и транспортно-

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ
ОКИСЛОВ АЗОТА
С ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ КОТЛОВ**

РД 34.02.304-ЯЯ
Взамен;
МУ 34-70-061-83

Срок действия установлен
с 01.12.88 до 01.12.98

Настоящие Методические указания распространяются на паровые котлы паропроизводительностью 75 т/ч и выше и водогрейные котлы мощностью 50 Гкал/ч и больше, сжигающие твердое, жидкое и газообразное топливо в факельных топочных устройствах, и устанавливают порядок и методы расчета выбросов окислов азота при проектировании новых и реконструкции действующих котлов.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сжигание топлива на тепловых электростанциях и в котельных приводит к выбросу в атмосферу продуктов сгорания органического топлива, содержащих токсичные окислы азота (главным образом окись азота и в меньшей степени — двуокись).

Количество образующихся окислов азота зависит от характеристики топлива и от конструктивного исполнения топочной камеры, поэтому на стадии проектирования котлов необходимо провести расчет ожидаемых выбросов окислов азота и предусмотреть меры по снижению их до величин, максимально приближающихся к санитарным нормам допустимой загазованности атмосферного воздуха.

В топках при горении топлива образуется 95-99% окиси азота NO и 1-5% более токсичной двуокиси азота NO₂. В атмосфере происходит неконтролируемое превращение NO в NO₂, в связи с чем расчет ведется условно на NO₂. Для расчета доли двуокиси азота в суммарном содержании NO_x в атмосферном воздухе при нормировании выбросов ТЭС применяется коэффициент 0,8.

Источниками окислов азота являются молекулярный азот воздуха, используемого в качестве окислителя при горении, и азотсодержащие компоненты топлива. В связи с этим принято делить окислы азота на воздушные и топливные. Воздушные, в свою очередь, можно разделить на термические, образующиеся при высоких температурах за счет окисления молекулярного азота атомарным кислородом (механизм Зельдовича) и так называемые «быстрые» окислы азота, образующиеся в зоне сравнительно низких температур в результате реакции углеводородных радикалов с молекулой азота и последующего взаимодействия атомарного азота с гидроксидом OH.

2. РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА

2.1. Количественные значения выбросов окислов азота M_{NO_x} (г/с) рассчитывают по удельным выбросам или по концентрации окислов азота:

$$M_{NO_x} = B_p \cdot Q_p^0 \cdot K_{NO_x}; \quad (1)$$

$$M_{NO_x} = B_p \cdot V_{c,r} \cdot C_{NO_x}. \quad (2)$$

где B_p — расчетный расход топлива, кг/с (m^3/c);

Q_p^0 — теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/ m^3);

K_{NO_x} — удельный выброс окислов азота в пересчете на двуокись, кг/ГДж;

C_{NO_x} — концентрация окислов азота, г/ m^3 , в сухой пробе газа при стандартных условиях и при определенном коэффициенте избытка воздуха α (рекомендуется все расчеты концентрации NO₂ при сжигании твердого топлива пересчитывать на $\alpha = 1,4$, а при сжигании газа и мазута — на $\alpha = 1,167$);

$V_{c,r}$ — объем сухих дымовых газов, м³/кг (м³/м³), при том же коэффициенте избытка воздуха α , что и C_{NO} ,

$$V_{c,r} = V_r^0 + 0,984(\alpha - 1)V^0 - V_{H_2O}^0, \quad (3)$$

где V^0 , V_r^0 и $V_{H_2O}^0$ — соответственно, объем воздуха, дымовых газов и водяных паров при стехиометрическом сжигании 1 кг (или 1 м³) топлива, м³/кг (м³/м³).

Соотношение между удельными выбросами и концентрацией окислов азота определяют по формуле:

$$K_{NO_2} = C_{NO_2} V_{c,r} / Q_n^p \quad (4)$$

3. РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

3.1. Исходные данные, необходимые для расчета удельных выбросов:

N^p — содержание азота в топливе в % на рабочую массу;

Q_n^p — теплота сгорания топлива, МДж/кг;

тип горелок (вихревые, прямоточные, с подачей пыли высокой концентрации);

α_r — коэффициент избытка воздуха в горелках;

α_1 — доля первичного воздуха по отношению к теоретически необходимому;

γ_r — степень рециркуляции дымовых газов через горелки, %;

w_2/w_1 — отношение скоростей в выходном сечении горелок;

$\Delta\alpha_r$ — рисосы в топке;

$\Delta\alpha_3$ — третичный воздух, подаваемый в топку помимо горелок;

$\Delta\alpha_{сбр}$ — сбросной воздух при транспорте пыли к горелкам горячим воздухом;

T_{ar}'' — температура за зоной активного горения, К.

3.2. Удельные выбросы окислов азота K_{NO_2} (кг/ГДж) складываются из топливных $K_{NO_2}^{тл}$ и воздушных $K_{NO_2}^{взд}$ окислов азота:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{тл} + K_{NO_2}^{взд} \quad (5)$$

3.3. Топливные окислы азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO_2}^{тл} = 0,7 \cdot N_r \cdot \beta_{\alpha} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_{\gamma} \cdot \beta_{w_2} \cdot \beta_{\Delta\alpha} \quad (6)$$

где N_r — содержание азота в топливе, кг/ГДж:

$$N_r = 10N^p / Q_n^p \quad (7)$$

Значения коэффициентов формулы (6) приведены в табл.1:

Т а б л и ц а 1

Фактор, который учитывается коэффициентом	Зависимость	Диапазон пригодности зависимости
Влияние коэф.избытка воздуха в вихревой горелке $\beta_{\alpha_r}^{вп}$	$(0,35\alpha_r + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
Влияние коэф.избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha_r}^{прм}$	$(0,53\alpha_r + 0,12)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
Влияние доли первичного воздуха в горелке β_{α_1}	$1,73\alpha_r + 0,48$	$0,15 \leq \alpha_1 \leq 0,55$
Влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух (без учета снижения температуры в зоне активного горения) β_{T_r}	$1 - 0,016\sqrt{T_r}$	$0 \leq T_r \leq 30\%$
Влияние максимальной температуры на участке образования топливных окислов азота β_v	$0,11\sqrt{T_{gr}''} - 1100$	$1250 \leq T_{gr}'' \leq 2050 \text{ К}$
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\beta_{w_2}^{вп}$	$0,4(w_2/w_1)^2 + 0,32$	$1,0 \leq w_2/w_1 \leq 1,6$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\beta_{w_2}^{прм}$	$0,98w_2/w_1 - 0,47$	$1,4 \leq w_2/w_1 \leq 4,0$

3.4. При транспорте пыли к горелкам высокой концентрации значение $K_{NO_x}^{пр}$, подсчитанное по формуле (6), 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 окислы азота образуются в зоне максимальных температур, то есть там, где поля концентраций, скоростей и температур отдельных горелок уже выровнялись. Следовательно, $K_{NO_x}^{взд}$ определяется в основном не особенностями горелок, а интегральными параметрами топочного процесса.

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

$$K_{NO_x}^{взд} = 1,54 \cdot 10^{16} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{\alpha_1}'' - 1}{\alpha_{\alpha_1}''}} \cdot e^{\frac{-6700}{T_{gr}''}} / \sqrt{T_{gr}''}, \quad (8)$$

где α_{α_1}'' — коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения, условно принимаемый как сумма организованно подаваемого воздуха и присосов через нижнюю часть топочной камеры, т.е.

$$\alpha_{\alpha_1}'' = \alpha_r + \frac{1}{2} \Delta\alpha_r + \Delta\alpha_{ср} + \Delta\alpha_3, \quad (9)$$

T_{gr}'' — температура на выходе из зоны активного горения, К.

Уравнение (8) справедливо в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $1,05 \leq \alpha''_{ar} \leq 1,4$ и до температуры $T''_{ar} = 2050$ К. При $T''_{ar} < 1800$ К величиной $K_{NO_2}^{зад}$, можно пренебречь.

В табл.2 справочного приложения 1 приведены значения $K_{NO_2}^{зад}$, при различных значениях α''_{ar} и T''_{ar} , а на черт.1,2 и 3 — номограммы для приближенного расчета количества выбросов топливных и воздушных окислов азота $K_{NO_2}^{ТМ}$ и $K_{NO_2}^{зад}$, а также их концентраций $C_{NO_2}^{ТМ}$ и $C_{NO_2}^{зад}$ в пересчете на коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$ ($O_2 = 6\%$)

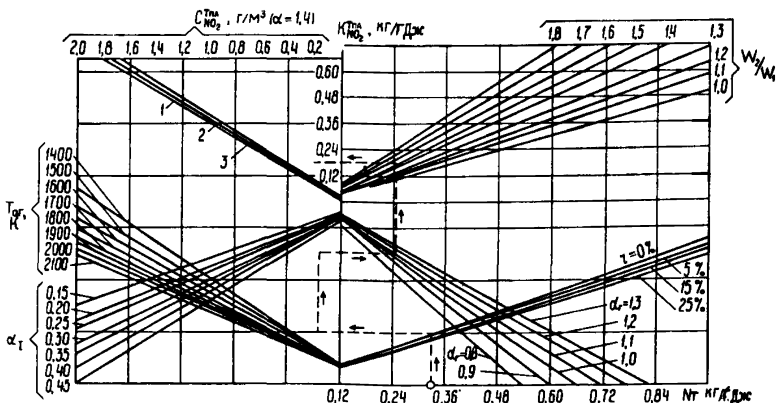
Температуру в конце зоны активного горения T''_{ar} рассчитывают по Руководящим указаниям «Проектирование топок с твердым шлакоудалением» (Ленинград, НПО ЦКТИ, вып.42, 1981).

3.6. Величина воздушных окислов азота $K_{NO_2}^{зад}$ может быть снижена за счет уменьшения T''_{ar} , причем эффективность любых мероприятий в этой области будет тем больше, чем выше исходное значение температуры.

Снижение величины топливных окислов азота $K_{NO_2}^{ТМ}$ может быть осуществлено путем изменения нескольких параметров, влияние которых учитывают приведенными выше безразмерными коэффициентами.

В качестве примера в табл.3 справочного приложения 2 приведены расчеты для котлов с жидким и твердым шлакоудалением (БКЗ-210-140Ф на промпродукте кузнецких каменных углей, БКЗ-420-140-5 на экибастузском СС и ТПП-312 на донецком ГСШ). Программа расчета на ЭВМ удельных выбросов окислов азота для пылеугольных котлов приведена в рекомендуемом приложении 3.

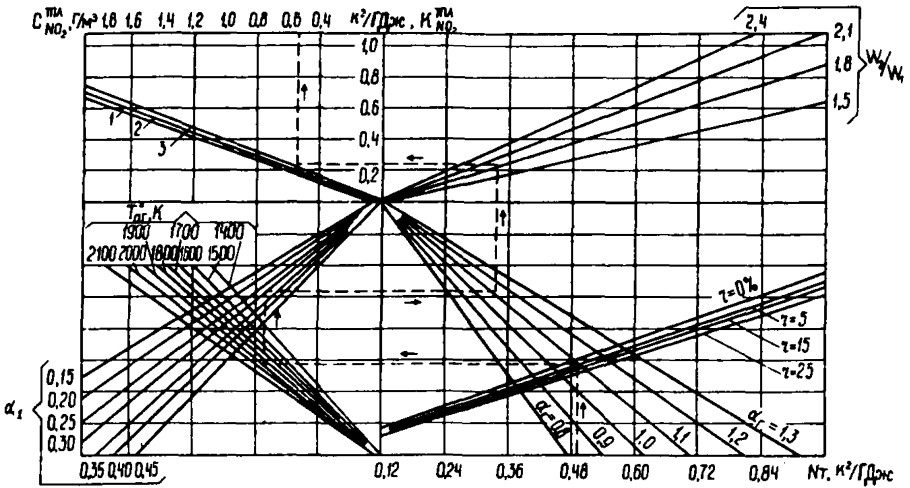
Номограмма для расчета выбросов и концентраций топливных окислов азота при установке вихревых горелок



1 — каменные угли; 2 — АШ и сланцы; 3 — бурые угли.

Черт. 1

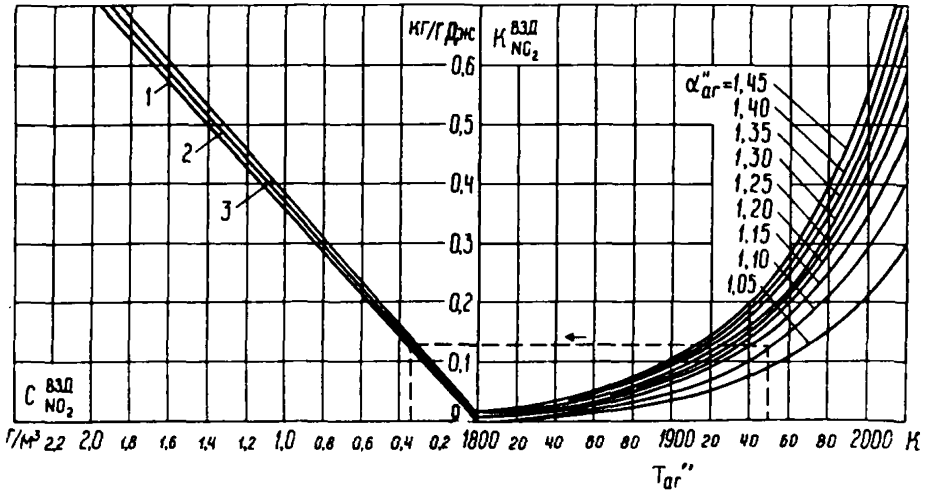
Номограмма для расчета выбросов и концентраций топливных окислов азота при установке прямоточных горелок



1 — каменные угли; 2 — АШ и сланцы; 3 — бурые угли.

Черт.2

Номограмма для расчета выбросов и концентраций воздушных окислов азота



1 — каменные угли; 2 — АШ и сланцы; 3 — бурые угли.

Черт.3

4. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗА И МАЗУТА

4.1. Исходные данные, необходимые для расчета концентрации оксидов азота в дымовых газах энергетических котлов:

D_n — номинальная паропроизводительность котла, кг/с;

D_p — фактическая паропроизводительность котла, кг/с;

Q_p^* — низшая располагаемая теплота сгорания топлива, МДж/м³ (МДж (кг));

V_p — располагаемый расход топлива, м³/с (кг/с)

Геометрические размеры зоны активного горения:

$a_{тп}$ — ширина топки (в свету), м (при наличии двухцветного экрана — ширина одной ячейки);

$b_{тп}$ — глубина топки (в свету), м;

$Z_{яp}$ — число ярусов горелок,

$h_{яp}$ — расстояние между осями соседних горелок (по высоте), м;

T_v — температура воздуха перед горелками, К;

α — коэффициент избытка воздуха в конце топки;

γ — степень (доля) рециркуляции дымовых газов, % (не более 20%);

$a_{рец}$ — коэффициент, зависящий от места ввода рециркулируемых газов: в под топки — 0,0025, в шлицы под горелки — 0,01, вокруг амбразуры горелки — 0,02, в дутьевой воздух и вокруг амбразуры горелки со скоростью, равной выходной скорости воздуха — 0,025;

δ — доля воздуха, подаваемого во вторую ступень горения (не более 30% от общего расхода воздуха);

$a_{ст}$ — коэффициент, учитывающий место подачи вторичного воздуха: навстречу факелу — 0,015, под горелками — 0,007, над горелками — 0,018;

g — водотопливное отношение при подаче влаги в зону горения (не более 10%);

$a_{вл}$ — коэффициент, учитывающий место ввода влаги: в корень факела через горелки — 0,025, в пристенную зону — 0,015;

N^p — содержание азота, связанного в топливе (мазуте), %.

4.2. На основании геометрических размеров топки определяем тепловую нагрузку лучевоспринимающей поверхности зоны активного горения

$$q_{лг} = \frac{Q_n^p \cdot V_p}{2(a_{тп} + b_{тп})Z_{яp}h_{яp} - 1,5a_{тп} \cdot b_{тп}}, \text{ МВт/м}^2. \quad (10)$$

П р и м е ч а н и е: при наличии в топке двухцветного экрана V_p принимается на одну ячейку.

Для топок с однорядным расположением горелок (единичной мощностью от 30 до 60 МВт) $Z_{яp}h_{яp} = 3$ м. При подовой компоновке горелок — единичной мощностью от 50 до 100 МВт $Z_{яp}h_{яp} = 7,5$ м, для горелок 101-160 МВт — $Z_{яp}h_{яp} = 10$ м.

4.3. Рассчитываем концентрацию окислов азота (мг/м^3) при коэффициентах избытка воздуха 1,02 — при номинальной нагрузке — без применения каких-либо мероприятий по снижению вредных выбросов по формулам (при $q_{\text{лг}}$ в пределах $0,5 < q_{\text{лг}} < 3,0 \text{ МВт/м}^2$). При сжигании газа

$$C'_{\text{NO}_x} = \frac{C_{\text{NO}_x}}{K_m} = 613 \cdot q_{\text{лг}}^{0,68} \quad (11)$$

При сжигании мазута

$$C'_{\text{NO}_x} = \frac{C_{\text{NO}_x}}{K_m} = 632 g_{\text{лг}}^{0,62} + 1000 (N^p - 0,25) (\alpha - 0,8). \quad (12)$$

Примечание: второй член учитывает «топливные» окислы азота.

4.4. Полученные результаты дополняем коэффициентами, учитывающими:

- тепловую производительность топки, K_m ;
- температуру воздуха, поступающего в горелки, K_{T_b} (при $T_b < 620 \text{ К}$);
- коэффициент избытка воздуха, K_α ;
- рециркуляцию, K_r ;
- ступенчатое сжигание, $K_{\text{ст}}$;
- подачу влаги, $K_{\text{вл}}$;
- действительную нагрузку котла, K_N .

$$C_{\text{NO}_x} = C'_{\text{NO}_x} K_m K_{T_b} K_\alpha K_r K_{\text{ст}} K_{\text{вл}} \cdot K_N, \quad (13)$$

4.5. Коэффициенты вычисляются по формулам:

$$K_m = 1 - \exp\left[-\frac{1,5 + Q^{0,41}}{7,1}\right], \quad Q = B_p \cdot Q_{\text{н}}^0; \quad (14)$$

$$K_{T_b} = 1 - 0,001 (620 - T_b); \quad (15)$$

$$K_\alpha = 1,35 - 43[\alpha - 1,09]^2 + 2(\alpha - 1,09); \quad (16)$$

$$K_r = 1 - a_{\text{рек}} \cdot r; \quad (17)$$

$$K_{\text{ст}} = 1 - a_{\text{ст}} \cdot \delta; \quad (18)$$

$$K_{\text{вл}} = 1 - a_{\text{вл}} \cdot g; \quad (19)$$

$$K_N = \left(\frac{D_p}{D_n}\right)^{1,25} \quad (20)$$

Примеры расчета концентрации окислов азота при сжигании газа и мазута приведены в справочном приложении 4. Программа расчета

на ЭВМ содержания окислов азота для газомазутных котлов приведена в рекомендуемом приложении 5.

5. РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ИЛИ КОНЦЕНТРАЦИЯ 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 окислов 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 окислов азота следует выполнять по формулам раздела 3.

5.2. В действующих котлах часто сжигаются одновременно уголь и мазут или уголь и газ. В этом случае расчет удельных выбросов K_{NO_2} (кг/ГДж) или концентрации окислов азота C_{NO_2} (г/м³) проводится по следующим формулам:

$$K_{NO_2}^{см} = q_1 (K_{NO_2})_1 + q_2 (K_{NO_2})_2 + \dots ; \quad (20)$$

$$C_{NO_2}^{см} = q_1 (C_{NO_2})_1 + q_2 (C_{NO_2})_2 + \dots , \quad (21)$$

где q_1, q_2, \dots — доля каждого из видов топлива по тепловыделению в топке, т.е.

$$q_1 = \frac{B_{p1} (Q_{н}^p)_1}{Q_T} , \quad q_2 = \frac{B_{p2} (Q_{н}^p)_2}{Q_T}$$

т.д.,

где B_{p1}, B_{p2}, \dots — расчетный расход каждого из видов топлива на котел, кг/с; $(Q_{н}^p)_1, (Q_{н}^p)_2, \dots$ — теплота сгорания каждого из видов топлива, МДж/кг; Q_T — суммарное тепловыделение в топке, МВт; $(K_{NO_2})_1, (K_{NO_2})_2$ — удельные выбросы окислов азота в пересчете на NO_2 кг/ГДж, рассчитанные исходя из предположения, что котел работает только на одном виде топлива. Соответственно, при сжигании угля величина K_{NO_2} определяется по формуле (5), а при сжигании газа или мазута — по формуле (13); $(C_{NO_2})_1, (C_{NO_2})_2$ — концентрации окислов азота в пересчете на NO_2 в г/м³, рассчитанные исходя из предположения, что котел работает на одном виде топлива. Соответственно, при сжигании угля величина C_{NO_2} определяется по формулам р.3, а при сжигании газа или мазута — по формуле (13).

5.3. По усредненным таким образом удельным выбросам $K_{NO_2}^{см}$, или концентрации окислов азота $C_{NO_2}^{см}$, можно рассчитать секундный

выброс окислов азота M_{NO_x} , г/с. Для этого пользуются формулами (1) или (2), подставляя условно усредненные значения $Q_{H_i}^{D_i}$ (МДж/кг), v_r (м³/кг) и суммарный расход топлива В (кг/с):

$$\bar{V} = (B_p)_1 + (B_p)_2 + \dots; \quad (22)$$

$$\bar{Q}_H^D = \frac{(Q_{H_i}^{D_i} \cdot (B_p)_1 + (Q_{H_i}^{D_i})_2 \cdot (B_p)_2 + \dots}{(B_p)_1 + (B_p)_2 + \dots}, \quad (23)$$

$$\bar{v}_r = \bar{v}_r^0 + (\alpha - 1) \bar{v}_r^0. \quad (24)$$

Для определения условно усредненного объема дымовых газов необходимо рассчитать условные расходы дымовых газов и воздуха при стехиометрическом сжигании каждого вида топлива

$$\bar{v}_r^0 = \frac{(v_r^0)_1 \cdot (B_p)_1 + (v_r^0)_2 \cdot (B_p)_2 + \dots}{(B_p)_1 + (B_p)_2 + \dots}; \quad (25)$$

$$\bar{v}^0 = \frac{(v^0)_1 (B_p)_1 + (v^0)_2 (B_p)_2 + \dots}{(B_p)_1 + (B_p)_2 + \dots} \quad (26)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Справочное

Таблица 2

Величина воздушных окислов азота $K_{NO_x}^{взд}$, кг/ГДж

$T_{ср}^D$, К	$\alpha_{N_2}^H$								
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
1800	0,005	0,007	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014
1820	0,008	0,011	0,013	0,015	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021
1840	0,012	0,017	0,020	0,023	0,025	0,026	0,028	0,029	0,031
1860	0,018	0,024	0,029	0,033	0,036	0,039	0,041	0,043	0,045
1880	0,026	0,036	0,043	0,048	0,053	0,057	0,060	0,063	0,066
1900	0,037	0,051	0,062	0,70	0,077	0,082	0,087	0,092	0,095
1920	0,054	0,074	0,089	0,100	0,110	0,118	0,125	0,131	0,137
1940	0,076	0,105	0,127	0,143	0,157	0,168	0,178	0,187	0,195
1960	0,108	0,149	0,179	0,203	0,222	0,238	0,252	0,265	0,276
1980	0,152	0,210	0,252	0,285	0,312	0,335	0,355	0,372	0,388
2000	0,212	0,292	0,351	0,417	0,435	0,467	0,495	0,520	0,542
2020	0,294	0,405	0,487	0,551	0,603	0,648	0,687	0,721	0,751

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

Таблица 3

**Пример расчета удельных выбросов и концентрации окислов азота
при сжигании твердого топлива**

Рассчитываемая величина	Формула или обоснование	БКЗ-210-140Ф		БКЗ-420-140-5	ТПП-312
		до реконструкции	после реконструкции		
Марка угля	Тех. задание на котел или эксплуатационные данные	Промпродукт кузнецкого каменного угля	Экибастузский СС	Донецкий ГСШ	
Содержание азота в топливе N^p , %	То же	1,6	1,6	0,8	1,0
Теплота сгорания топлива $Q_{и}^p$, МДж/кг	То же	20,95	20,95	15,87	20,94
Содержание азота в топливе N_t , кг/ГДж	$10N^p/Q_{и}^p$	0,76	0,76	0,504	0,48
Тип горелок	Описание котла	Прямоточные		Вихревые	
Коэффициент избытка воздуха в горелках α	Тепловой расчет котла или эксплуатационные данные	1,12	0,95	1,20	1,15
Доля первичного воздуха α_1	То же	0,24	0,24	0,3	0,26
Степень рециркуляции дымовых газов через горелки Γ , %	Тепловой расчет котла или эксплуатационные данные	4	4	0	0

Рассчитываемая величина	Формула или обоснование	БКЗ-210-140Ф		БКЗ-420-140-5	ТПП-312
		до реконструкции	после реконструкции		
Температура за зоной активного горения $T_{гг}$, К	По Руководящим указаниям «Проектирование топок с твердым шлакоудалением» (Л.: НПО ЦКТИ, вып.42, 1981)	1700	1700	1830	1930
Отношение скоростей в выходном сечении горелок w_2/w_1	Тепловой расчет котла для эксплуатационные данные	2,0	1,8	1,48	1,4
Присосы в топке $\Delta a_г$ и третьяное дутье Δa_3	То же	0,10	0,10+0,17	0	0,05
Коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения $\alpha_{акг}$	$\alpha_г + \Delta a_г / 2 + \Delta a_3$	1,17	1,17	1,2	1,175
Влияние коэффициента избытка воздуха в горелке $\beta_{акг}$	$(0,53\alpha_{акг}^{0,75} + 0,12)^2$ $(0,36\alpha_{акг}^{0,75} + 0,4)^2$	0,509	0,389	0,67	0,639
Влияние доли первичного воздуха β_{α_1}	$1,73\alpha_1 + 0,48$	0,895	0,895	1,0	0,930
Влияние рециркуляции газов через горелки $\beta_{гг}$	$1 - 0,016\sqrt{r}$	0,968	0,968	1,0	0,955
Влияние температуры на образование топливных NO_x , β_t	$0,11\sqrt[3]{T_{гг} - 1100}$	0,929	0,929	0,99	1,033
Влияние смесеобразования в корне факела $\beta_{см}$	$(0,98w_2/w_1 - 0,47) - \text{прм}$ $0,4(w_2/w_1)^2 + 0,32 - \text{вхр}$	1,49	1,294	1,196	1,104
Топливные окислы азота $K_{NO_x}^{тв}$, кг/ГДж	Формула (6)	0,325	0,215	0,28	0,22
Воздушные окислы азота $K_{NO_x}^{взд}$	Формула (8) или табл. 2 приложения 1	0,0	0,0	0,022	0,114
Суммарное значение окислов азота K_{NO_x} , кг/ГДж	$K_{NO_x}^{тв} + K_{NO_x}^{взд}$	0,325	0,215	0,302	0,334
Концентрация окислов азота в дымовых газах C_{NO_x} , г/м ³ , при нормальных условиях и $\alpha = 1,4$	$K_{NO_x} \cdot Q_p^0 / V_{гг}$	0,98	0,64	0,84	0,93

**ПОДПРОГРАММА РАСЧЕТА НА ЭВМ
УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА
ДЛЯ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ**

Подпрограмма написана на языке Фортран применительно к машине БЭСМ-6 и является дополнением к Программе ТКЗ-ЦКТИ для позонного расчета горения и теплообмена в топочных камерах.

Кроме принятых в этой программе использованы следующие параметры:

Т а б л и ц а 4

Наименование параметра	Обозначение в методике	Обозначение на печати	Размерность
Содержание азота в топливе	N_f	PNT	кг/ГДж
Коэффициент, учитывающий влияние доли первичного воздуха в горелке	β_{α_1}	PSIL1	—
Коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух	β_{Γ_1}	PSIRG	—
Коэффициент, учитывающий влияние коэффициента избытка воздуха в горелке	β_{α_1}	PSILG	—
Коэффициент, учитывающий смесеобразование в корне факела	β_{α_2}	PSISM	—
Коэффициент, учитывающий влияние температуры на начальном участке факела	β_v	PSIV	—
Коэффициент избытка воздуха, в зоне активного горения	α_{ar}	PLAG	—
Температура на выходе из зоны активного горения	T_{gr}^*	TAG	К
Теплота сгорания топлива, низшая	Q_f	QRN	МДж/кг
Объем дымовых газов при нормальных условиях и избытке воздуха $\alpha=1.4$	v_{Γ}	VG	— м ³ /кг

```

SUBROUTINE AZOT.
REAL KNO2TR, KNO2B3, KNO2
DIMENSION ZH (17, 12)
READ 5, TIR GOR, PLG, PL1, PC, W1W2, DLT, DL3,
      DLSBR, NZ, VOG, VO
5 FORMAT (8F5, 2, I5, 2F5.2)
  TAG=ZH (8NZ) +273
  IF (0.9. LE. PLG. AND. PLG. LE. 1.3) GO TO 10
  PRINT 215.
  PRINT9, PLG
9 FORMAT (70X, 'АГР=', F8.3)
10 IF (8.24.LE.PL1.AND.PL1.LE.041) GO TO 20
  PRINT 215.
  PRINT 19, PL1.
19 FORMAT (70X, 'АПВ=', F8.3)
20 IF (8. LE. RG. AND. RG. LE. 30) GO TO 30
  PRINT 215
  PRINT 29, RG
29 FORMAT (70X, 'РГ=', F8.3)
30 IF (TAG. LT. 1250.) GO TO 35
  IF (2050. LT. TAG.) GO TO 45
  GO TO 40
35 PRINT 39
39 FORMAT ('Внимание! Вследствие ТАГ меньше 1250 счет
остановлен')
  GO TO 95
  PRINT 215
45 PRINT 46, TAG
46 FORMAT (70X, 'ТАГ=', F8.3)
40 PNT=10, * PNP/QRN
  VG=VOG+0.4 *.VO
  PLAG=PLG+DLT/2. +DL3+DLSBR
  PSIL1=1.73 * PL1+0.48
  PSIRG=1.-0.016 * SQRT(RG)
  IF(TIPGOR.LT. 0.5) GO TO 50
  IF(1.0. LE. W1W2. AND. W1W2. LE. 1.7)GO TO 55
  PRINT 54, W1W2
54 FORMAT (70X, 'OC=', F8.3)
55 RSILG=(0.35 * PLG+0.4) * * 2
  PSISM=0.4 * W1W2 * * 2+0.32
  GO TO 60
50 IF(1.5. LE. W1W2. AND. W1W2. LE. 2.4)GO TO 57
  PRINT 215
  PRINT 56, W1W2
56 FORMAT (70X, 'OC=', F8.3)
57 PSILG=(0.53 * PLG+0.12) * * 2
  PSISM=0.98 * W1W2-0.47

```



```

PSIV=0.11 * (TAG-1100) * * (1./3)
KNO2TR=0,7 * PNT * PSIL1 * PSIRG * PSILG * PSISM *
PSIV
IF (TAG-LT. 1800) GO TO 70
KNO2B3=1.54D16 * SQRT ((PLAG-1.)/ PLAG) *
EXP (-6.7E4/ TAG /SQRT(TAG))
GO TO 80
KNO2B3=0
KNO2=KNO2TR+KNO2B3
KN02 = CNO2 * QRN/VG
PRINT 100
) FORMAT (42X, 'исходные данные для расчета окислов азота'//)
IF(TIPGOR. LE. 0.5) GO TO 110.
PRINT 105
; FORMAT(47X, 'тип горелки — вихревая'//)
GO TO 118
) PRINT 115
; FORMAT (47X, 'тип горелки — прямоточная'//)
; PRINT 120
) FORMAT (25X, 77 (25X, 77('—'))
PRINT 125
; FORMAT (27X, 'ТГ', 5X, 'АГР', 4X, 'АПВ', 4X,
'ПГ', 5X, 'ОС', 5X, 'АТ', 5X, 'АТР', 4X,
'АСБ', 4X, 'НЗ', 5X, 'ОГ', 5X, 'ОВ')
PRINT 120
PRINT 130
) FORMAT (25X, '3(3X, '————', 3X)', 3X, '%', 3X,
5(3X, '————', 3X), 2(1X, 'ММ3/КГ))
PRINT 120

PRINT 135, TIP GOR, PLG, PL1, PC, WIW2, DLT, DL3, DLSBR,
N3, VOG, VO
5 FORMAT (25X, 8F 7.3, 2X, I2, 3X, 2F7.3)
PRINT 120
DO 140 I=1,5
) PRINT 145
;5 FORMAT (128X)
PRINT 150
;0 FORMAT (47X, 'сводная таблица расчетных величин'//)
PRINT 160
;0 FORMAT (32X, 63('————'))
PRINT 165
;5 FORMAT (34X, 'N наименование', 17X, 'обзнач. размерн.
значение')
PRINT 170
70 FORMAT (33X, 'п/п расчетных величин', 30X, 'величин')
PRINT 160

```

```

PRINT 175, KNOTR
175 FORMAT (34X, '1 топливные окислы азота', 9X, 'КТП
КГ/ГДЖ', F8.3)
PRINT 180, KNO2B3
180 FORMAT (34X, '2 воздушные окислы азота', 9X, 'KB3
КГ/ГДЖ', F8.3)
PRINT 185, KNO2
185 FORMAT (34X, '3 суммарные окислы азота', 9X, 'КСМ
КГ/КДЖ', F8.3)
PRINT 190, CNO2
190 FORMAT (34X, '4 концентрация окислов азота', 9X,
'CNO г/м3', F8.3)
CONTINUE
PRINT 160
DO 195, I=1,5
195 PRINT 200
200 FORMAT (128X)
PRINT 205
205 FORMAT (115X, 12 ('——') / 115X, 'факел')
PRINT 210
210 FORMAT ('I' 126('——'), 'I')
215 PRINT 220
220 FORMAT ('Внимание! За пределы проверенного диапазона'
* IX, 'выходит исходный параметр')
RETURN
END

```

Таблица 5

Примеры расчета концентрации окислов азота при
При температуре

сжигании газа и мазута (при номинальной нагрузке)
воздуха более 500 К

топлива	Тип котла	Концентрация окислов азота $\alpha=1,02$	Коэффициент избытка воздуха	Содержание азота в топливе	Доля рециркуляции	Способ подачи газов рециркуляции
		C'_{NO_x} мг/м ³	α	мг %	г %	рец
Мазут	ТГМП-314	800	1,015	0,38	6	0,025
Газ		850	1,025	—	4	
Мазут		789	1,020	0,38	16	
Мазут		789	1,020	0,38	4	
Мазут		789	1,10	0,38	4	
Мазут	ТГМП-1202	1132	1,015	0,4	12	0,02
Мазут		1132	1,02	0,4	15	0,02
Газ		1397	1,015	—	4,5	0,02
Газ		1397	1,02	—	14	0,02
Мазут	БКЗ-320	494	1,036	0,5	0	—
Мазут	ТГМ-94	584	1,01	0,3	10	0,025
Мазут	ТП-80	698	1,07	0,3	3	0,025
Мазут	ПК-41	660	1,06	0,72	0	—
Мазут	ПК-41	658	1,02	0,72	0	—
Мазут	ПК-41	660	1,06	0,72	17,5	0,025
Мазут	ПК-41	660	1,05	0,72	16,0	0,025
Нефть	ПК-41	656	1,05	0,55	0	—
Нефть	ПК-41	655	1,03	0,55	10	0,025
Мазут	ПК-41	659	1,03	0,72	17,5	0,025
Мазут	ПК-41	660	1,05	0,72	0	—
Мазут	ПК-41	661	1,08	0,72	0	—
Газ	ПК-47	442	1,00	—	0	—
Газ	ПК-47	442	1,134	—	0	—
Мазут	ПК-47	507	1,116	0,42	0	—

Среднее значение ошибок = $\frac{0,42012}{24} = 0,017505 = 0,13231$ или 13,2%

При температуре

Вид топлива	Тип котла	Концентрация окислов азота $\alpha=1,02$	Коэффициент избытка воздуха	Содержание азота в топливе
		C'_{NO_x} мг/м ³	α	мг %
Газ	ПТВМ-100	673	1,03	0

тепловой производности топка (одного корпуса)	Коэффициенты			Результаты		Разница между расчетным и экспериментальным результатом	Квадрат относительной ошибки
	избытка воздуха (действ.)	рециркуляции	расчета	непосредственного определения по контрольной методике			
K_1	K_2	K_3	C'_{NO_x} мг/м ³	C''_{NO_x} мг/м ³	$C' - C''$ мг/м ³	$\left(\frac{C' - C''}{C'}\right)^2$	
0,92	0,96	0,85	601	539	62	0,01323	
	1,04	0,90	732	760	-28	0,0014	
	1,00	0,60	436	370	66	0,031813	
	1,00	0,90	653	719	66	0,008342	
	1,36	0,90	888	1027	-139	0,018193	
0,98	0,96	0,76	809	780	29	0,001382	
	1,00	0,70	776	803	-107	0,014684	
	0,96	0,91	1123	1100	23	0,000437	
	1,00	0,72	925	850	75	0,007863	
0,78	1,12	1,00	432	472	-40	0,007341	
0,87	0,91	0,75	347	345	2	0,000026	
0,87	1,29	0,925	725	678	47	0,004722	
0,92	1,25	1,00	759	719	40	0,003095	
0,92	1,00	1,00	605	657	-52	0,006178	
0,92	1,25	0,56	425	329	96	0,085214	
0,92	1,20	0,60	437	370	67	0,032971	
0,92	1,20	1,00	724	616	108	0,030866	
0,92	1,08	0,75	488	554	-66	0,014147	
0,92	1,08	0,56	367	308	59	0,036295	
0,92	1,20	1,0	729	863	134	0,024233	
0,92	1,33	1,0	809	1027	218	0,045141	
0,77	0,79	1,00	269	256	13	0,002527	
0,77	1,124	1,00	383	351	32	0,008076	
0,77	1,27	1,00	495	431	64	0,021924	
						$\Sigma = 0,42012$	

воздуха менее 500 К

тепловой производности топки	Коэффициенты			Результаты		Разница между расчетным и экспериментальным результатом	Относительная ошибка
	избытка воздуха	горячего воздуха	расчета	непосредственного определения по контрольной методике			
K_1	K_2	K_3	C'_{NO_x} мг/м ³	C''_{NO_x} мг/м ³	$C' - C''$ мг/м ³	$\frac{C' - C''}{C'}$	
0,7	1,08	0,68	346	350	-4	-0,011	

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Рекомендуемое

**Программа расчета на ЭВМ содержания окислов азота
для газомазутных котлов**

Программа написана на языке Фортран применительно к машине ЕС СМ-1420.

В программе употребляются параметры, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Наименование параметра	Обозначение		Размерность
	в методике	на печати	
Номинальная паропроизводительность котла	D_n	DN	кг/с
Фактическая паропроизводительность котла	D	D	« »
Низшая располагаемая теплота сгорания топлива	Q_n^*	QPH	$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$ $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Располагаемый расход топлива	V^p	BP	$\text{м}^3/\text{с}; \text{ кг}/\text{с}$
Ширина топки (в свету)	$a_{тн}$	AT	м
Глубина топки (в свету)	$b_{тн}$	BT	« »
Число ярусов горелок	$Z_{яp}$	Z	—
Расстояние между осями соседних горелок (по высоте)	$h_{яp}$	H	м
Температура воздуха перед горелками	T_0	TB	К
Коэффициент избытка воздуха в конце топки	α	ALFA	—
Степень (доля) рециркуляции дымовых газов	r	R	%
Коэффициент, зависящий от места ввода рециркуляции	a_{pec}	AR	—
Доля воздуха, подаваемая во вторую ступень горения	δ	DELTA	%
Коэффициент, учитывающий место подачи вторичного воздуха	$a_{ст}$	ACT	—
Водотопливное отношение при подаче влаги в зону горения	g	G	%

Наименование параметра	Обозначение		Размерность
	в методике	на печати	
Коэффициент, учитывающий место ввода влаги	$a_{вл}$	AB	—
Содержание азота, связанного в топливе (мазуте)	N^P	NP	%
Тепловая нагрузка лучевоспринимающей поверхности	$q_{лг}$	QLG	МВт/м ²
Концентрация окислов азота при коэффициенте избытка воздуха 1,02	C'_{NO_x}	CN	мг/м ³
Коэффициент, учитывающий тепловую производительность топки	$K_{тл}$	KM	—
Коэффициент, учитывающий температуру воздуха, поступающего в горелки	$K_{та}$	KTB	—
Коэффициент, учитывающий величину избытка воздуха	K_{α}	KA	—
Коэффициент, учитывающий рециркуляцию	K_r	KR	—
Коэффициент, учитывающий ступенчатое сжигание	$K_{ст}$	KCT	—
Коэффициент, учитывающий подачу влаги	$K_{вл}$	KB	—
Коэффициент, учитывающий действительную нагрузку котла	K_N	KN	—

На печать выведены следующие параметры:

Коэффициент избытка воздуха в конце топки	α	ALFA	—
Тепловая нагрузка лучевоспринимающей поверхности зоны активного горения	$q_{лг}$	QLG	МВт/м ²
Степень (доля) рециркуляции дымовых газов	r	R	%
Температура воздуха перед горелками	T_a	TB	К
Фактическая нагрузка котла	D	D	кг/с
Концентрация окислов азота	C_{NO_x}	CNOX	мг/м ³

REAL NP, KM, KTB, KA, KR, KCT, KB, KN

- 1 FORMAT (' если в качестве топлива используется газ/' *' нажмите клавишу «1», если мазут — клавишу «2»')
- 3 FORMAT (' введите следующие для расчета данные:/'*'» — номинальная паропроизводительность котла (кг/с) DN='')
- 5 FORMAT ('» — фактическая паропроизводительность * котла (кг/с) D='')
- 10 FORMAT ('» — низш.:я теплота сгорания топлива (МДж/м³ * или МДж/кг) QPH='')
- 15 FORMAT (I1)
- 20 FORMAT ('» — располагаемый расход топлива (м³/с или кг/с) BP='')
- 25 FORMAT ('» — ширина топки (м) AT='')
- 30 FORMAT ('» — глубина топки (м) BT='')
- 35 FORMAT ('» — число ярусов горелок Z='')
- 40 FORMAT ('» — расстояние между осями соседних горелок * по высоте (м) H = '')
- 45 FORMAT ('» — температура воздуха перед горелками (К) TB='')
- 50 FORMAT ('» — коэффициент избытка воздуха в конце топки * ALFA='')
- 55 FORMAT ('» — степень (доля) рециркуляции дымовых газов (не более 20%) R = ,
- 60 FORMAT ('» — доля воздуха, подаваемая во вторую ступень * горения (не более 30% от общего расхода воздуха) * DELTA='')
- 65 FORMAT ('» — водотопливное соотношение при подаче * влаги в зону горения (до 10%) G = '')
- 70 FORMAT ('» — содержание азота, связанного в топливе * (мазуте), (%) NP='')
- 13 FORMAT (E 13.4)
- 75 FORMAT ('» — коэффициент, зависящий от места ввода * рециркулируемых газов (при вводе '/' рециркуляции * в под топки — 0,0025; в шлицы под горелки — 0,01; / *' вокруг амбразуры горелок — 0,02; в дутьевой воздух / *' и вокруг амбразуры горелки со скоростью, равной '/' *' выходной скорости воздуха — 0,025) AR='')
- 80 FORMAT ('» — коэффициент, учитывающий место подачи * вторичного воздуха (навстречу факелу — '/' / 0,015; под * горелки — 0,007; над горелками — 0,018) ACT='')
- 85 FORMAT ('» — коэффициент, учитывающий место ввода * влаги' / (в корень факела через горелки — 0,025;/' *' в пристенную зону — 0,015) AB='')
- 90 FORMAT ('» — величина Z*H для топок с однорядным расположением '/' горелок (единичной мощностью от *30 до 60 МВт)=3M; '/' при подовой компоновке * горелок (единичной мощностью от 50 '/' до 100 МВт)

* = 7 м; для горелок мощностью от 101 до 160 МВт =

* 10 м '/' ZH=')

WRITE (S,1)

READ (5,15)KFUEL

WRITE (5,3)

READ (5,13)DN

WRITE (5,5)

READ (5,13)D

WRITE (5,10)

READ (5,13)QPH

WRITE (5,20)

READ (5,13)BP

WRITE (5,25)

READ (5,13)AT

WRITE (5,30)

READ (5,13) BT

WRITE (5,35)

READ (5,13)Z

WRITE (5,40)

READ (5,13)H

WRITE (5,45)

READ (5,13) TB

WRITE (5,50)

READ (5,13) ALFA

WRITE (5,55)

READ (5,13)R

WRITE (5,60)

READ (5,13) DELTA

WRITE (5,65)

READ (5,13)G

WRITE (5,70)

READ (5,13)NP

WRITE (5,75)

READ (5,13)AR

WRITE (5,80)

READ (5,13)ACT

WRITE (5,85)

READ (5,13)AB

WRITE (5,90)

READ (5,13)ZH

QLG=QPH * BP/(2*(AT+BT)*Z*H+1,5*AT*BT

IF(0.5.LT.QLG. AND.QLG.LT.3.0)GO TO 100

PRINT 200

100 Q=BP*QPH

KM=1.-EXP(-(1.5+Q**0.41)/7.1)

IF(TB.GE.500)GO TO 105

* IX, ' выходит исходный параметр)
250 WRITE (5,251)
251 FORMAT (' расчет окончен')
STOP
END

Подписано в печать 24.11.88. Формат 60×90 1/16. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,92. Тираж 1065 экз. Заказ № 7854. Цена 50к

ПМБ ВТИ им. Ф.Э.Дзержинского.
109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.