

6. **Активное сопротивление индуктора при индукционном нагреве внутренних цилиндрических поверхностей / С. Лупи [и др.] // Электротехника. – 2010. – № 5. – С. 43–46**

7. **Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.**

УДК 621.128

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ДУТЬЯ, ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ, С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ NO_x

Анализ условий образования NO_x показывает, что протеканию этого процесса способствуют высокие температуры в рабочей камере, локальные высокотемпературные участки в зоне факела, избыток кислорода в зоне синтеза NO_x, а также высокое тепловое напряжение топочного объема. В настоящее время разработаны и внедрены разнообразные технологические способы, позволяющие уменьшить объемы выбросов NO_x [1].

Условная классификация и перечень основных способов снижения выбросов оксидов азота приведены на рисунке 1.

Перечисленные методы позволяют в определенной степени снизить концентрации азота в локальных высокотемпературных участках факела и при этом уменьшить температуру горения, что, в свою очередь, приводит к снижению объемов выбросов NO_x. Но данные способы имеют ограничения, определяемые стабильностью процесса горения. Уменьшение количества воздуха в зоне горения приводит соответственно к снижению количества кислорода.

Технологические методы снижения выбросов оксидов азота

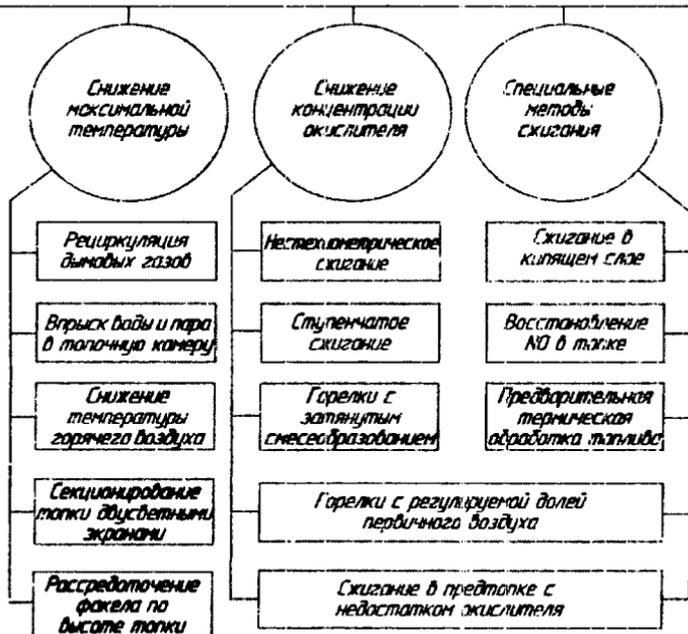


Рисунок 1 – Технологические методы снижения выбросов оксидов азота

Учитывая вышесказанное, а также результаты исследований, посвященных применению кислорода при сжигании топлива [2], целесообразно выполнить анализ воздействия повышенной концентрации кислорода в воздухе на процесс образования оксидов азота.

Согласно теории Я.Б. Зельдовича [3] равновесная концентрация оксидов азота, образующихся при горении углеводородных топлив, может быть рассчитана по формуле:

$$[C_{\text{NO}}] = 4,6 \sqrt{C_{\text{N}_2} C_{\text{O}_2}} \cdot \exp[-21500/(RT)], \quad (1)$$

где C_{N_2} , C_{O_2} – концентрации азота и кислорода в исходной смеси, R – универсальная газовая постоянная; T – температура в зоне горения, К.

При определении концентраций NO важнейшей задачей является расчет температуры в зоне горения. Ниже приведены результаты расчетов температур горения природного газа при различных значениях коэффициента избытка воздуха (α) и процентном содержании кислорода в окислителе (β).

В качестве исходных данных примем следующие: состав сухого природного газа (в объеме, %): $\text{CH}_4 = 90,17$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 4,38$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,89$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 1,45$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,16$; $\text{H}_2\text{S} = 0$; $\text{CO}_2 = 0,24$; $\text{N}_2 = 1,71$; влагосодержание топлива $d_t = 0,01 \text{ кг/м}^3$, воздуха $d_a = 0,015 \text{ кг/м}^3$; коэффициент избытка воздуха $\alpha_a = 1,24$ (диапазон варьирования $\alpha = 1 \dots 1,3$); температура смеси $T_0 = 300 \text{ К}$; давление смеси $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$.

Теоретическое количество кислорода, необходимое для сгорания 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{O}_{2\text{T}}} = 0,01 \left[\sum (n + 0,25m) \text{C}_n\text{H}_m + 1,5\text{H}_2\text{S} \right],$$

где H_2S – содержание соответствующего газа 1 м^3 в газовой смеси, %; C_nH_m – содержание i -го углеводорода, %; m, n – количество атомов углерода и водорода в химической формуле углеводорода соответственно.

После подстановки данных получаем

$$V_{\text{O}_{2\text{T}}} = 1,961 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{O}_2} = 0,0476 \left[\sum (n + 0,25m) \text{C}_n\text{H}_m + 1,5\text{H}_2\text{S} \right] = 9,332 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество диоксида углерода, образующегося при полном сгорании 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \left(\sum n \text{C}_n\text{H}_m + \text{CO}_2 \right) = 0,99 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где CO_2 – содержание соответствующего газа 1 м^3 в газовой смеси, %.

Количество SO_2 , образующееся при сгорании 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot \text{H}_2\text{S} = 0,01 \cdot 0 = 0.$$

Количество водяных паров, образующихся при сгорании 1 м^3 газа:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(0,5 \sum m C_n H_m + \text{H}_2\text{S}) + 1,24(d_{\text{T}} + \alpha_{\text{B}} V_{\text{O}_2\text{T}} d_{\text{B}}) = 2,17 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где d_{B} , d_{T} – влагосодержание топлива и воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Количество кислорода, входящего в состав продуктов сгорания газа (при $\alpha_{\text{B}} = 1,24$):

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha_{\text{B}} - 1)V_{\text{O}_2\text{T}} = 0,47 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество азота, образующегося при сгорании 1 м^3 газа (при $\alpha_{\text{B}} = 1,24$):

$$V_{\text{N}_2} = 0,79\alpha_{\text{B}}V_{\text{O}_2\text{T}} + 0,01N_{2\text{T}} = 9,19 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где $N_{2\text{T}}$ – содержание азота в газовой смеси, %.

Полный объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{r}} = V_{\text{сух}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 12,82 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Определим объем сухих продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 м^3 газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{сух}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2},$$

$$V_{\text{сух}} = 12,82 - 2,17 = 10,65 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Результаты определения состава продуктов сгорания 1 м^3 природного газа сведены в таблицу 1.

Для проверки результатов вычислений выполнен расчет состава продуктов полного сгорания природных газов (таблица 2).

Таблица 1 – Состав продуктов сгорания 1 м³ природного газа

α_n	Выход продуктов сгорания, м ³					$V_{сyx}$	V_r
	V_{CO_2}	V_{SO_2}	V_{N_2}	V_{O_2}	V_{H_2O}		
$\alpha_n = 1$	0,99	0,00	7,42	0,00	2,13	8,41	10,54
$\alpha_n = 1,24$	0,99	0,00	8,89	0,392	2,16	10,28	12,44

Определим адиабатную температуру горения газовой смеси при постоянном объеме и при постоянном давлении. Расчет адиабатной температуры горения T_a производится по известному составу продуктов сгорания газовой смеси, °С:

$$T_a = \frac{Q_H^p + T_T \sum r_i C_{Vi} + \alpha_n V_0 C_{Vb} T_b}{\sum V_j C_{Vj}},$$

где Q_H^p – низшая рабочая теплота сгорания 1 м³ природного газа при 0,101325 МПа и 0 °С без учета теплоты конденсации водяных паров, МДж/м³); T_b , T_T – начальное значение температур соответственно газобразного топлива и воздуха; r_i , C_{Vi} – соответственно объемная доля и средняя в диапазоне от 0 до T_T изохорная объемная теплоемкость i -го компонента природного газа, включая балласт; V_0 – стехиометрический объем смеси воздуха с кислородом, необходимый для сжигания 1 м³ газа; C_{Vb} – средняя изохорная объемная теплоемкость воздуха в диапазоне температур от 0 до T_b ; V_j , C_{Vj} – объем и удельная теплоемкость газов, образующихся при сгорании 1 м³ природного газа.

Внутренняя энергия продуктов сгорания 1 м³ топлива с учетом коэффициента избытка воздуха α_n определяется по формуле:

$$Q_H^p = \sum r_i Q_{Hi},$$

где Q_{Hi} – низшая теплота сгорания i -го компонента (простого газа), входящего в состав топлива. В таблице 3 приведены значения Q_{Hi} для горючих компонентов природного газа.

Таблица 2 – Состав продуктов полного сгорания природных газов

Компоненты газовой смеси и их содержание в долях			Расход воздуха, м ³		Выход продуктов сгорания, м ³				
			O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂
Горючие смеси	CH ₄	0,932	1,864	7,009	0,932	1,864	7,009	0,000	0,000
	C ₂ H ₆	0,007	0,025	0,092	0,014	0,021	0,092	0,000	0,000
	C ₃ H ₈	0,006	0,030	0,113	0,018	0,024	0,113	0,000	0,000
	C ₄ H ₁₀	0,0045	0,029	0,110	0,018	0,023	0,110	0,000	0,000
	C ₅ H ₁₂	0,0016	0,013	0,048	0,008	0,010	0,048	0,000	0,000
	H ₂ S	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Итого для горючих компонентов топлива при α _в = 1,0			1,96	7,37	0,99	1,94	7,37	0,00	0,000
			9,33						
Балласт	CO ₂		0,24		0,0024	0	0	0	0
	N ₂		1,71		0	0	0,047	0	0
	H ₂ O		–		0	0,01	0	0	0
Избыточный воздух с содержанием водяного пара			1,87		0	0,21	1,47	0,39	0
Итого для газовой смеси			11,199		0,99	2,16	8,89	0,39	0,000

Таблица 3 – Значения Q_{H} для горючих компонентов природного газа, МДж/м³

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ S
Q_{H}	35,82	63,75	91,4	118	146	23,65

В соответствии с таблицей 3 определяем:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = \sum r_i Q_{\text{H}i} = 35143 \text{ КДж/м}^3.$$

Значение T_{a} , необходимое для вычисления C_p , заранее неизвестно, поэтому T_{a} определяют методом последовательных приближений. Температуру находим графоаналитическим методом. Для этого задаемся рядом значений температуры $T_{\text{av(p)}}$, близким к предполагаемому. По таблице средних объемных теплоемкостей газов для каждой $T_{\text{av(p)}}$ определяются $C_{\text{p(v)}}$, далее подсчитываются соответствующие значения T_{a} . Строится график зависимости $T_{\text{a}} = T_{\text{a}}(T_{\text{av(p)}}$). Истинное значение T_{a} находим как точку пересечения полученной кривой с прямой $T_{\text{a}} = T_{\text{av(p)}}$.

Средние теплоемкости простых газов и продуктов сгорания приведены в таблицах 4 и 5.

Результаты определения адиабатной температуры горения газовой смеси при постоянном объеме с учетом данных таблиц 6 и 7 приведены в таблице 8.

Таблица 4 – Средние в диапазоне от -30 до +50 °С значения объемной теплоемкости и показателя адиабаты простых газов

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S	H ₂ O	Воздух
C_V	1,177	1,837	2,675	3,883	4,76	0,923	1,232	1,135	1,124	0,926
C_p	1,55	2,212	3,05	4,31	5,133	1,294	1,601	1,508	1,494	1,297

Таблица 5 – Средние объемные теплоемкости продуктов сгорания природного газа, кДж/(м³·К)

Газ, теплоемкость		Температура, °С									
		800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
CO ₂	C_p	2,131	2,204	2,264	2,314	2,355	2,392	2,42	2,448	2,476	2,504
	C_V	1,76	1,833	1,893	1,943	1,985	2,02	2,051	2,082	2,113	2,144
H ₂ O	C_p	1,668	1,723	1,777	1,828	1,876	1,921	1,963	2,005	2,047	2,089
	C_V	1,297	1,352	1,406	1,457	1,505	1,55	1,592	1,634	1,676	1,718
N ₂	C_p	1,372	1,397	1,42	1,441	1,459	1,475	1,489	1,503	1,517	1,531
	C_V	1,001	1,018	1,049	1,07	1,088	1,104	1,118	1,132	1,146	1,16
O ₂	C_p	1,45	1,478	1,5	1,52	1,538	1,554	1,569	1,584	1,599	1,614
	C_V	1,079	1,107	1,13	1,149	1,167	1,183	1,198	1,213	1,228	1,243
SO ₂	C_p	2,181	2,236	2,278							
	C_V	1,813	1,867	1,905							

Таблица 6 – Определение $\Sigma r_i C_i$ при постоянном объеме

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	$\Sigma r_i C_i$
$r_i C_i$, кДж/(м ³ ·К).	1,097	0,013	0,016	0,017	0,008	0,043	0,003	1,197

Таблица 7 – Определение $\Sigma V_j C_j$ при постоянном объеме

Газ, теплоем- кость, кДж/(м ³ ·К)	Температура, °С									
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
CO ₂ $V_j C_j$	1,747	1,819	1,879	1,928	1,970	2,005	2,035	2,066	2,097	2,128
H ₂ O $V_j C_j$	2,813	2,932	3,049	3,160	3,264	3,362	3,453	3,544	3,635	3,726
N ₂ $V_j C_j$	9,198	9,354	9,639	9,832	9,997	10,144	10,273	10,401	10,530	10,658
O ₂ $V_j C_j$	0,508	0,521	0,531	0,540	0,549	0,556	0,563	0,571	0,578	0,585
SO ₂ $V_j C_j$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\Sigma V_j C_j$	14,265	14,626	15,098	15,460	15,780	16,067	16,324	16,582	16,839	17,097

Таблица 8 – Результаты расчета адиабатной температуры горения T_a при постоянном объеме, °С

	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Q_H , КДж	35143	35143	35143	35143	35143	35143	35143	35143	35143	35143
$T_{\text{в}}$, °С	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
$\sum r_i C_{i, \text{в}}$ КДж/(м ³ ·К)	1,197	1,197	1,197	1,197	1,197	1,197	1,197	1,197	1,197	1,275
$\alpha_{\text{в}}$	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,05
V_0 , м ³	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	10,273
$C_{V_{\text{в}}}$	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926	0,926
$T_{\text{в}}$, °С	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
$\Sigma V_j C_j$	14,265	14,626	15,098	15,460	15,780	16,067	16,324	16,582	16,839	17,097
T_a , °С	2468,53	2407,58	2332,2	2277,6	2231,50	2191,66	2157,08	2123,58	2091,10	2059,68

График для определения адиабатной температуры горения газовой смеси при постоянном объеме представлен на рисунке 2.

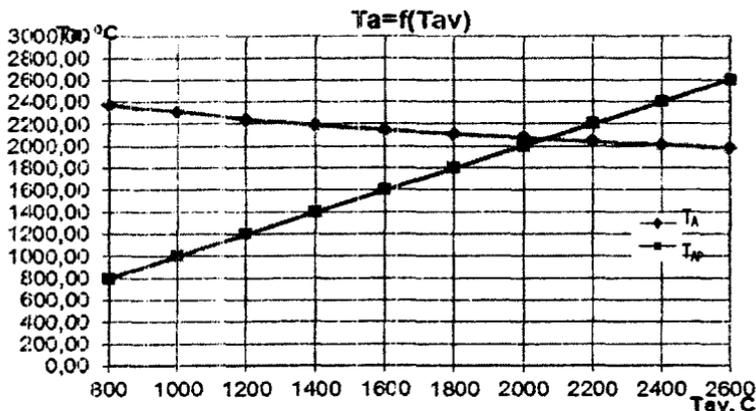


Рисунок 2 – График для определения адиабатной температуры горения газовой смеси при постоянном объеме

Адиабатная температура горения газовой смеси при постоянном объеме $T_{a(v)} = 2070 °C = 2343 K$.

Аналогичные расчеты проведены при определении адиабатной температуры горения газовой смеси при постоянном давлении. Результаты расчетов представлены в таблицах 9, 10, 11 и рисунке 3. Адиабатная температура горения газовой смеси при постоянном давлении $T_{a(p)} = 1650 °C = 1923 K$.

Аналогичные расчеты по определению адиабатных температур горения природного газа выполнены при различном процентном содержании кислорода в окислителе β и при различном соотношении избытка воздуха α . Результаты представлены в таблице 12.

Так как теплообменные и теплофизические процессы, протекающие в рабочем пространстве нагревательных печей и котлов, происходят при постоянном давлении, то при образовании оксидов азота представляют интерес адиабатные температуры горения при постоянном давлении, которые в указанных диапазонах измерения коэффициента избытка воздуха α (по кислороду) и степени обогащения дутья кислородом β приведены в таблице 12 и на рисунке 4.

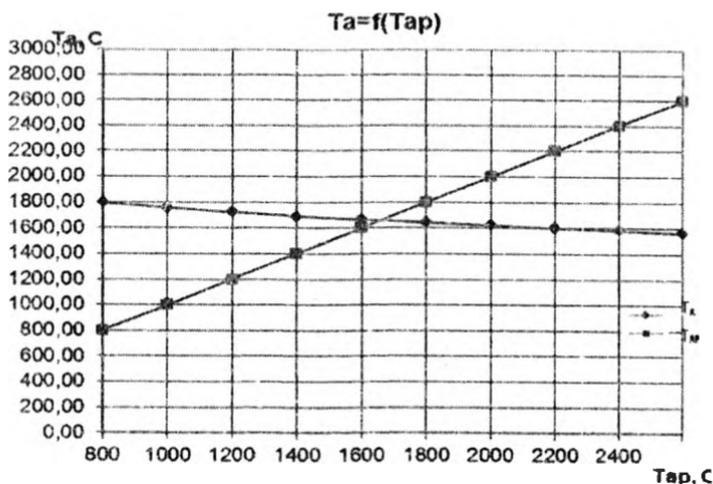


Рисунок 3 – График для определения адиабатной температуры горения газовой смеси при постоянном давлении

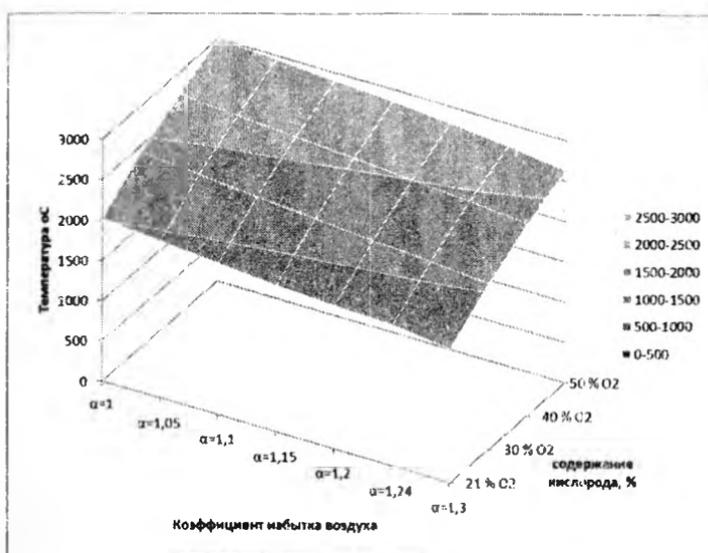


Рисунок 4 – Зависимость температуры горения газовой смеси от коэффициента избытка воздуха α (по кислороду) и степени обогащения дутья кислородом

Таблица 9 – Определение $\Sigma r_i C_i$ при постоянном давлении

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S	$\Sigma r_i C_i$
$r_i C_i$	1,445	0,015	0,018	0,019	0,008	0,060	0,004	0,000	1,570

Таблица 10 – Определение $\Sigma V_j C_j$ при постоянном давлении

Газ, теп- лоем- кость		Температура, °C									
		800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
CO ₂	$V_j C_j$	2,115	2,187	2,247	2,296	2,337	2,374	2,402	2,43	2,457	2,48
H ₂ O	$V_j C_j$	3,617	3,737	3,854	3,964	4,069	4,166	4,257	4,35	4,439	4,53
N ₂	$V_j C_j$	12,606	12,836	13,047	13,240	13,406	13,553	13,681	13,81	13,939	14,07
O ₂	$V_j C_j$	0,682	0,695	0,706	0,715	0,723	0,731	0,738	0,75	0,752	0,759
SO ₂	$V_j C_j$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\Sigma V_j C_j$		19,021	19,455	19,854	20,216	20,535	20,824	21,078	21,333	21,587	21,842

Таблица 11 – Результаты расчета адиабатной температуры горения T_a при постоянном давлении, °С

	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
$Q_{нв}$ кДж	35143,49									
$T_p, ^\circ\text{C}$	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
$\Sigma r_i C_i$	1,570	1,570	1,570	1,570	1,570	1,570	1,570	1,649	1,570	1,649
α_b	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,05	1,24	1,05
$\bar{V}_0, \text{м}^3$	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	9,332	10,273	9,332	10,273
C_{Vb}	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297	1,297
$T_b, ^\circ\text{C}$	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
$\Sigma V_j C_j$	19,021	19,455	19,854	20,216	20,535	20,824	21,078	21,33	21,587	21,84
$T_a, ^\circ\text{C}$	1871,18	1829,38	1792,68	1760,53	1733,21	1709,17	1688,52	1667,18	1648,70	1628,32

Таблица 12 – Результаты определения адиабатных температур при сжигании природного газа при различном процентном содержании кислорода в окислителе и коэффициенте избытка воздуха

Адиабатная температура горения газовой смеси при постоянном объеме, $T_{ав}$, °C							
% O ₂	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,05$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,15$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,24$	$\alpha = 1,3$
21	2470	2400	2320	2250	2185	2130	2065
30	2900	2810	2750	2700	2625	2585	2515
35	3070	3000	2920	2880	2810	2750	2700
40	3225	3160	3100	3025	2950	2870	2830
50	3450	3400	3370	3300	3230	3160	3100
Адиабатная температура горения газовой смеси при постоянном давлении, $T_{ар}$, °C							
% O ₂	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,05$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,15$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,24$	$\alpha = 1,3$
21	2010	1940	1875	1810	1770	1740	1650
30	2425	2350	2285	2225	2160	2115	2050
35	2600	2530	2465	2400	2335	2290	2225
40	2725	2670	2620	2560	2500	2450	2380
50	3000	2950	2900	2850	2790	2720	2630

Полученные значения адиабатных температур горения природного газа использованы для расчетов образования оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха α (по кислороду) и степени обогащения дутья кислородом. Расчеты, выполненные по формуле Я.Б. Зельдовича (1), показывают, что с ростом концентрации кислорода в исходной смеси возрастает и температура факела. Это приводит к росту концентрации NO в продуктах сгорания. Но, несмотря на указанный факт, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о целесообразности обогащения воздуха кислородом с точки зрения снижения вредных выбросов. Объясняется это тем, что при использовании кислорода уменьшается объем воздуха в исходной смеси газов и, как следствие, снижается концентрация азота в исходной смеси и сокращаются общие объемы выбросов NO. Сказанное проиллюстрировано на рисунке 5.

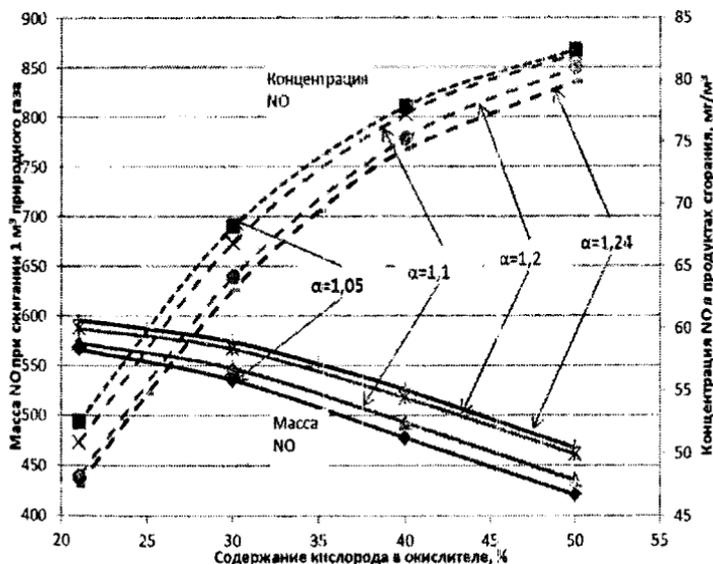


Рисунок 5 – Зависимость концентрации NO и объема выбросов NO при сжигании 1 м³ природного газа от концентрации кислорода в исходной смеси «воздух-кислород» и коэффициента избытка воздуха

Из рисунка 5 очевидно, что по мере увеличения содержания кислорода в исходной смеси при прочих равных условиях, объем NO в продуктах сгорания уменьшается. Уже при концентрации 40 % O₂ в подаваемом на горение воздухе объем выбросов NO сокращается на 12 %, а при повышении содержания кислорода до 50 % – на 21,5 %.

Выводы. Таким образом, с точки зрения экологии применение кислорода для обогащения воздушного дутья при сжигании топлива в котлах и промышленных печах является целесообразным и позволит существенно сократить объемы выбросов NO_x в окружающую среду. При расчетах экономической эффективности данных мероприятий необходимо учитывать изменение эффективности тепловой работы теплогенерирующего оборудования при использовании воздуха, обогащенного кислородом, проанализировать различные варианты получения кислорода в зависимости от необходимого объема, степени обогащения, стоимости эксплуатации кислородного оборудования, а также требования промышленной безопасности.

Литература

1. Сигал, И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И.Я. Сигал; изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.

2. Котлер, В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В.Р. Котлер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

3. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей РУП «БМЗ» путем обогащения воздушной смеси кислородом / С.М. Кабишов [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – Спецвыпуск. – С. 218–221.

4. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.