

## Охрана окружающей среды

УДК 504.5:628.33

**Сигал И.Я.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Сигал А.И.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **Марасин А.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Кернажицкая Е.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

<sup>2</sup> **Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев**

ул. Желябова, 2а, 03680 Киев, Украина, e-mail: office@engecology.com

### Особенности влияния рециркуляции продуктов сгорания на образование оксидов азота в котлах при сжигании природного газа

Показано, что при сжигании природного газа и подаче в виде балласта газов рециркуляции (продуктов сгорания) необходимо учитывать, что они содержат оксиды азота, в основном в виде NO, который не разлагается в зоне горения, а добавляется к оксидам азота, образующимся при сжигании топлива. Продукты сгорания являются доступным, но не идеальным балластом. С одной стороны, они снижают максимальную температуру в зоне горения и концентрации реагентов, то есть снижается образование «термических» NO<sub>x</sub>, с другой — вносят в зону горения дополнительное количество оксида азота, которое суммируется с образующимся при горении в топке, понижая эффективность метода. При рециркуляции продуктов сгорания их влияние на образование оксидов азота тем выше, чем выше максимальная температура в зоне горения и чем лучше перемешивание всего объема топлива и балласта до зоны горения. Наиболее эффективным балластом, снижающим образование NO при горении, является диоксид углерода при условии его хорошего предварительного молекулярного перемешивания с природным газом до зоны горения. *Библ. 16, рис.2, табл. 4.*

**Ключевые слова:** оксиды азота, рециркуляция, балласт, горение, диоксид углерода.

Среди методов снижения образования оксидов азота при сжигании природного газа наиболее часто применяется ступенчатое сжигание, технически реализованное в конструкции горелочного устройства, и балластирование зоны горения [1–3].

Практически единственным балластом, получившим широкое распространение, являются продукты сгорания топлива [1–5]. При этом 10–25 % продуктов сгорания, представляющих

смесь газов N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub> с примесью оксидов азота (например, при сжигании природного газа из сети г. Киева при α = 1,15 образуется такой состав дымовых газов котлов: CO<sub>2</sub> — 8,6 %, H<sub>2</sub>O — 17,4 %, N<sub>2</sub> — 71,5 %, O<sub>2</sub> — 2,5 %, NO<sub>x</sub> ≤ 250 мг/нм<sup>3</sup> [1, 6]), с температурой 100–150 °С подаются из хвостовой части котла в дутьевой воздух и далее в зону горения топлива, снижая максимальную температуру, концентрации реагирующих веществ и создавая

условия для снижения образования оксидов азота [1, 3].

Обычно в продуктах сгорания газа в котлах содержится 100–450 мг/нм<sup>3</sup> оксидов азота (при O<sub>2</sub> = 3 %, сухие газы), состоящих по объему на 97–98 % из NO и на 2–3 % из NO<sub>2</sub>. При подаче в дутьевой воздух 18–20 % рециркулируемых продуктов сгорания максимальная температура в топочной камере снижается на 150–180 °C [1], концентрация кислорода в зоне горения падает с 20,9 до около 18,5 %. При больших избытках воздуха и низких нагрузках доля NO<sub>2</sub> может достигать 10–20 %. Причем наличие в рециркулируемых газах оксидов азота на процесс горения и образования новых оксидов азота в расчетах не учитывается.

Несмотря на значительное количество исследований и работ, посвященных условиям образования NO<sub>x</sub> в процессах горения [1–8] и выходу NO<sub>x</sub> за котлом до и после подачи газов рециркуляции [2–8], процессы, протекающие в зоне горения при подаче газов рециркуляции, изучены недостаточно. Независимо от того, влияют ли оксиды азота, содержащиеся в рециркулируемых продуктах сгорания, на конечный выброс NO<sub>x</sub> котлоагрегатом, они оказывают влияние на концентрацию NO<sub>x</sub> и реакции в предпламенной зоне и в зоне горения.

Проведенные в нашей лаборатории экспериментальные исследования [2, 3] показали, что при равном количестве и равном коэффициенте избытка воздуха (O<sub>2</sub> = 3 %, сухие газы) эффективность влияния на образование оксидов азота при вводе диоксида углерода вместо рециркулируемых продуктов сгорания природного газа повышается примерно на 41,7–48,8 % или почти в 1,5 раза при коэффициенте рециркуляции  $\gamma = 0,25$  (табл. 1).

Степень рециркуляции дымовых газов  $\gamma$  — это отношение расхода дымовых газов, отбираемых на рециркуляцию, к расходу дымовых газов за местом отбора, (нм<sup>3</sup>/с)/(нм<sup>3</sup>/с). При подаче в дутьевой воздух вместо газов рециркуляции CO<sub>2</sub> диоксид углерода выбрасывается в атмосферу, но при расчете  $\gamma$  мы считаем его отобранным и условно не учитываем в объеме уходящих газов.

В работе [9] высказано предположение о необходимости учета NO<sub>x</sub>, вводимом с продуктами сгорания (с газами рециркуляции), однако не рассмотрен возможный эффект этого влияния. Вместе с тем наряду со снижением максимальной температуры и концентрации кислорода в зоне горения следует учитывать: а) влияние NO, содержащегося

в газах рециркуляции, на суммарное количество NO за фронтом горения; б) влияние NO<sub>2</sub> в газах рециркуляции, прежде всего продуктов его распада в предпламенной зоне и в зоне горения с выделением атомов и радикалов, в том числе N, O и других, на реакции горения. Экспериментальные данные о влиянии NO и NO<sub>2</sub>, вводимых с балластом, практически отсутствуют.

Пренебрегая незначительным количеством NO<sub>2</sub>, который может реагировать в зоне горения, можно предположить, что практически все количество оксидов азота, содержащееся в газах рециркуляции в виде NO, проходит через зону горения без преобразования и суммируется с оксидами, образующимися в зоне горения (сухие газы):

$$\text{NO}_x^K = \text{NO}_x^\Gamma + \text{NO}_x^B, \quad (1)$$

где NO<sub>x</sub><sup>K</sup> — оксиды азота в конечных продуктах сгорания, которые выбрасываются в дымовую трубу, мг/нм<sup>3</sup>; NO<sub>x</sub><sup>Γ</sup> — оксиды азота, образующиеся в зоне горения (сухие газы), мг/нм<sup>3</sup>; NO<sub>x</sub><sup>B</sup> — оксиды азота, вносимые в зону горения со смесью дутьевого воздуха и газов рециркуляции (пересчитанные на объем уходящих сухих дымовых газов), мг/нм<sup>3</sup>.

С использованием данных работы [1]:

$$\text{NO}_x^\Gamma \approx \text{NO}_x^H (1 - A \cdot \gamma) - \text{NO}_x^B, \quad (2)$$

где NO<sub>x</sub><sup>H</sup> — начальное количество NO<sub>x</sub>, которые образуются в котлоагрегате без использования рециркуляции; A — интенсивность рециркуляции — снижение NO<sub>x</sub> в долях на 0,01 долю газов рециркуляции (или в процентах на 1 % газов рециркуляции);  $\gamma$  — степень рециркуляции (в долях от 1).

Расчетное соотношение балластных оксидов азота в конечных NO<sub>x</sub><sup>K</sup> (принимая, что все количество оксидов азота, которые содержатся в газах рециркуляции, проходит через зону горения без преобразования) в зависимости от степени рециркуляции приведено на рис. 1.

**Таблица 1. Снижение NO<sub>x</sub> при вводе продуктов сгорания или чистого CO<sub>2</sub> в дутьевой воздух**

Режим	Степень рециркуляции $\gamma$	Снижение NO <sub>x</sub> при разном балласте, %			Повышение эффективности при замене продуктов сгорания на CO <sub>2</sub> , %
		продукты сгорания газа	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> *	
1	0,10	24	34	26	41,7
2	0,20	39	56	45	43,6
3	0,25	43	64	52	48,8

\* Условно принимаем, что CO<sub>2</sub> вычитается из уходящих дымовых газов и подается в дутьевой воздух как газы рециркуляции.

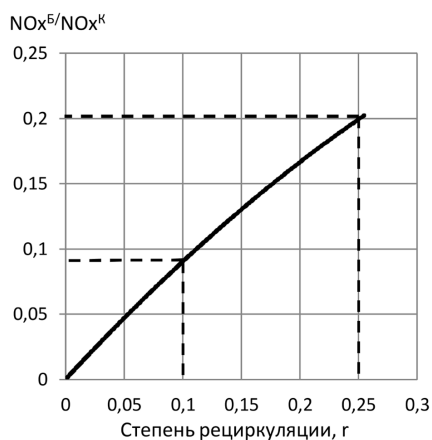


Рис.1. Соотношение балластных оксидов азота в конечных  $NO_x$  в зависимости от степени рециркуляции.

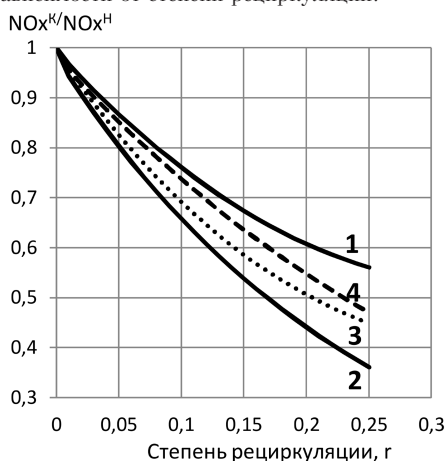


Рис.2. Снижение выбросов  $NO_x$  в зависимости от балласта, подающегося в дутьевой воздух: 1 — дымовые газы содержащие  $NO_x$ ; 2 — диоксид углерода (продукты сгорания разбавлены балластным  $CO_2$ ); 3 — смесь  $N_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2O$  в пропорции дымовых газов за вычетом  $NO_x$  (расчет); 4 — диоксид углерода с вычетом балластного  $CO_2$  из дымовых газов (расчет).

С учетом рис.1 и табл.1 можно построить зависимость снижения выбросов  $NO_x$  в зависимости от состава балласта, подающегося в дуть-

евой воздух при различных условиях введения, от степени рециркуляции (рис.2).

Незначительное снижение эффективности балласта  $CO_2$ , который подается в дутьевой воздух и вычитается в дальнейшем из дымовых газов, по сравнению с балластом — дымовыми газами без примесей  $NO_x$ , возможно, связано с влиянием балластных оксидов азота, присутствующих в дымовых газах, на образование новых  $NO_x$ . Безразмерный присоединенный расход струи природного газа  $\Delta G^\circ = (G - G_0)/G_0$  (здесь  $G$ ,  $G_0$  — текущий и начальный расход струи, кг/с, на расстоянии  $x$  по аэродинамической оси от сопла  $d_0$ ) на тех же калибрах сопла в случае большей доли  $CO_2$  в дутьевом воздухе будет больше и удельная массовая теплоемкость ( $c_p$ ) у диоксида углерода выше, чем у  $N_2$  или  $O_2$  при температурах горения природного газа. Это должно снижать оксиды азота в соответствии с термическим механизмом [10–12]. Так, при  $\gamma = 0,2$  плотность окислительной смеси (воздуха и балласта) при температуре  $20^\circ C$  и давлении  $101,325$  кПа в случае подачи в качестве балласта в дутьевой воздух газов рециркуляции составляет  $\rho \approx 1,19$  кг/м<sup>3</sup>, а в случае  $CO_2$  —  $1,33$  кг/м<sup>3</sup>.

Как видно из рис.1, для большинства практически используемых режимов работы котлов на газе ( $\gamma = 0,1-0,25$ ) теоретически возможное снижение эффективности метода рециркуляции из-за учета поступления  $NO_x$  с газами рециркуляции находится в пределах 9–20 % и может быть принято в среднем 15 % от снижения  $NO_x$  в результате рециркуляции продуктов сгорания.

В табл.2 представлены наши экспериментальные данные [2] по снижению образования  $NO_x$  при различной степени рециркуляции: 0,2, 0,3 и 0,5 при нагрузке котла КВГМ-180, близкой к номинальной (92–96 %), а также 63 % от номинальной. Из нее видно, что переход от степени рециркуляции 0,3 к 0,5 при полной на-

**Таблица 2. Снижение выхода  $NO_x$  при рециркуляции продуктов сгорания в дутьевой воздух в котле КВГМ-180**

Показатель	Нагрузка 92–96 %			Нагрузка 63 %		
	I	II	III	I	II	III
Теплопроизводительность, Гкал/ч	165,9	168,7	173,5	112,7	112,7	112,7
Степень рециркуляции $\gamma$	0	0,3	0,5	0	0,2	0,3
Температура уходящих газов, $^\circ C$	164	180	181	117	130	150
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_{yx}$	1,35	1,35	1,33	1,23	1,24	1,21
Концентрация $NO_x$ , приведенная к $\alpha = 1$ , мг/м <sup>3</sup>	330	110	100	120	55	45
Снижение $NO_x$ , %	0	67	70	0	54	62
КПД котла, брутто, %	91,78	91,00	91,08	94,78	94,14	94,07
Потери КПД котла из-за рециркуляции, %	0	0,78	0,70	0	0,64	0,71

Примечание. I — без рециркуляции, II, III — с рециркуляцией.

грузке и от 0,2 к 0,3 при частичной сопровождается лишь незначительным снижением выхода оксидов азота, что можно объяснить как минимум двумя факторами: снижением температурной ступеньки [12]; увеличением количества  $\text{NO}_x$ , вводимых с балластом.

В табл.3 приведены наши данные [1, 3] и данные других авторов [4, 5] по влиянию условий ввода дымовых газов.

**Таблица 3. Усреднение влияния способа подачи газов рециркуляции на снижение выхода  $\text{NO}_x$ \***

№№ п/п	Способ подачи газов рециркуляции в топку	A
1	В топливо	4,5–6
2	В первичный воздух	3,0–3,5
3	В общий канал дутьевого воздуха	2,5–3
4	По кольцевому каналу вокруг горелки	1,2–1,5
5	Через шлицы напротив нижнего яруса горелок	1,0
6	Через шлицы под горелками	0,8–1,0
7	Через шлицы в поду топки	0,2

\* В долях на 0,01 долю газов рециркуляции или в процентах на 1 % рециркуляции.

Согласно экспериментальным данным, при добавлении продуктов сгорания в дутьевой воздух с увеличением количества балласта его эффективность снижается [3, 4, 13]. Так, в диапазоне  $\gamma = 0-0,1$  средняя эффективность снижения  $\text{NO}$  составляет 5–6 в долях на 0,01 долю газов рециркуляции (или в процентах на 1 % газов рециркуляции), в диапазоне  $\gamma = 0,1-0,2$  – на 2,5–3, в диапазоне  $\gamma = 0,25-0,3$  – всего на 1–1,5.

При подаче газов рециркуляции в топливный газ удельное снижение оксидов азота составляет 4,5–6, что примерно в 2–3 раза выше, чем при подаче газов рециркуляции в дутьевой воздух. Здесь A характеризует усредненное удельное снижение  $\text{NO}_x$  в долях на 0,01 долю газов рециркуляции (или в процентах на 1 % газов рециркуляции) при рециркуляции продуктов сгорания:

$$A = (\text{NO}_x^H - \text{NO}_x^K) / (\text{NO}_x^H \cdot \gamma). \quad (3)$$

В нашей работе [13] была предложена, исследована и показана эффективность метода подачи газов рециркуляции не в воздух, а в природный газ. Институтом газа НАН Украины в 1999–2000 гг. разработано, изготовлено и введено в эксплуатацию на Северо-Донецкой ТЭЦ мощное газогорелочное устройство для котла производительностью по пару 100 т/ч, в котором осуществлено предварительное сме-

шение газов рециркуляции с природным газом до начала горения.

Испытание горелочного устройства в действующем котле подтвердило предварительные данные авторов о резком повышении эффективности рециркуляции при предварительном перемешивании газов рециркуляции (продуктов сгорания) с топливом (природным газом), а не с окислителем (воздухом). Это можно объяснить снижением максимальной температуры именно в зоне протекания химических реакций (горения) из-за ее разбавления более холодными продуктами сгорания и, следовательно, снижением образования оксидов азота по термическому механизму и концентраций реагирующих веществ – реагентов и активных частиц в зоне реакции [12–16].

На основании наших работ [1, 2] и экспериментальных исследований, проведенных в Институте газа НАН Украины [3], составлена таблица усредненной эффективности снижения образования оксидов азота при подаче различного балласта в топку с природным газом (топливом) (в долях на 0,01 долю газов рециркуляции или в процентах на 1 % газов рециркуляции) (табл.4).

**Таблица 4. Эффективность ввода балласта в топку с топливным газом**

№№ п/п	Способ подачи балласта в топливо	A
1	Газ мусорных свалок и биогазы с $\text{CO}_2 = 20-50$ % (при $\text{NH}_3 = 0$ )	8–9,5
2	Искусственно подготовленные смеси «природный газ + $\text{CO}_2$ »	8–9,5
3	Неполное перемешивание $\text{CO}_2$ с природным газом в горелке	4,5–6
4	Смешение продуктов сгорания с природным газом в горелке	4,5–6
5	Искусственно подготовленные смеси «природный газ + $\text{N}_2$ »	5

Из нее видно, что молекулярное перемешивание трехатомного балласта ( $\text{CO}_2$ ) с природным газом до зоны горения дает наилучший эффект относительно снижения образования и выбросов оксидов азота.

## Выводы

При рециркуляции продуктов сгорания их влияние на образование оксидов азота тем выше, чем выше максимальная температура в зоне горения и чем лучше перемешивание всего объема топлива и балласта до зоны горения. Наиболее эффективным балластом, снижающим образование  $\text{NO}$  при горении, является диоксид углерода при условии его хорошего предварительного молекулярного перемешивания с природным газом до зоны горения.

При подаче в виде балласта газов рециркуляции (продуктов сгорания) необходимо учитывать, что они содержат оксиды азота, в основном в виде NO, который не разлагается в зоне горения, а добавляется к оксидам азота, образующимся при сжигании топлива. Для большинства режимов сжигания природного газа в котлах фактическое снижение эффективности рециркуляции за счет дополнительно вносимых оксидов азота с продуктами рециркуляции составляет в среднем 15 %. Для выяснения механизма возможного влияния балластных оксидов азота  $\text{NO}_x^B$  на суммарный выброс  $\text{NO}_x^K$  требуются дополнительные исследования. Также специального изучения требует влияние продуктов распада  $\text{NO}_2$ , содержащегося в рециркулирующих продуктах сгорания, прежде всего атомов N и O, на реакции в предпламенной зоне и в зоне горения газа.

Следует учитывать, что продукты сгорания являются доступным, но не идеальным балластом, так как, с одной стороны, снижают максимальную температуру в зоне горения и концентрации реагентов, то есть снижают образование «термических»  $\text{NO}_x$ , с другой — вносят в зону горения дополнительное количество NO, которое суммируется с образующимся при горении в топке, понижая эффективность метода.

### Список литературы

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л. : Недра, 1988. 313 с.
2. Сигал И.Я., Дубоший А.Н., Сигал А.И., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выброса оксидов азота котлами электростанций. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 1. С. 48–52.
3. Сигал И.Я., Смихула А.В., Дубоший А.Н., Горбунов А.В., Гобунов А.А. Снижение образования оксидов азота при сжигании природного газа. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2016. № 4. С. 44–51.
4. Росляков П.В. Методы защиты окружающей среды : Учеб. для вузов. М. : Издат. дом Моск. энерг. ин-та, 2007. 336 с.
5. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 144 с.
6. Сорока Б.С., Горуна В.В. Анализ процесса конденсации водяного пара в газовых атмосферах и продуктах сгорания. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. № 1. С. 3–18.
7. Ходаков Ю.С. Оксиды азота и теплоэнергетика : Проблемы и решения. М. : Эст.-М, 2001. 432 с.
8. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. *Промышленная теплотехника*. 2009. Т. 31, № 4. С. 5–11.
9. Сігал О.І., Бикоріз Є.Й. Вплив вологи, як складової топкових баластів на процес утворення окислів азоту. В кн.: Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Севастополь. 2005. С. 37–44.
10. Ricou F.P., Spalding D.B. Measurements of entrainment by asymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. Vol. 11, № 1. P. 21–32.
11. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй. М. : Наука, 1974. 272 с.
12. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1947. 145 с.
13. Сигал И.Я., Дубоший А.Н. Интенсификация методов снижения образования окислов азота в котлах. Проблемы теплоэнергетики : *Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву*, Ташкент, 13–17 окт. 1986 г. Черноголовка, 1986. С. 52–55.
14. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in pre-mixed hydrocarbon flames. *Thirteenth Symposium on Combustion*. Pittsburgh : Combustion. Inst., 1971. pp. 373–380.
15. Сигал И.Я., Марковский А.В., Нижник С.С., Гуревич Н.А. Образование окислов азота в топках котельных агрегатов. *Теплоэнергетика*. 1972. № 4. С. 57–60.
16. Chojnacki D. Developments in Ultra-Low NO Burner/Boilers. *Proceedings of the 1992 International Gas Research Conference*. Orlando, Florida, 1992. pp. 351–361.

Поступила в редакцию 01.10.18

**Сігал І.Я.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, проф., **Сміхула А.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Сігал О.І.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **Марасін О.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук,  
**Кернажицька О.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Інститут газу НАН України, Київ**

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

<sup>2</sup> **Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ**

вул. Желябова, 2а, 03680 Київ, Україна, e-mail: office@engecology.com

## **Особливості впливу рециркуляції продуктів згоряння на утворення оксидів азоту в котлах при спалюванні природного газу**

Показано, що при спалюванні природного газу та подачі у вигляді баласту газів рециркуляції (продуктів згоряння) необхідно враховувати, що вони містять оксиди азоту, в основному у вигляді NO, який не розкладається у зоні горіння, а додається до оксидів азоту, що утворюються при спалюванні палива. Продукти згоряння є доступним, але не ідеальним баластом. З одного боку, вони знижують максимальну температуру у зоні горіння та концентрації реагентів, тобто знижується утворення «термічних» NO<sub>x</sub>, з іншого — вносять у зону горіння додаткову кількість оксиду азоту, яка підсумовується з тим, що утворюється при горінні у топці, знижуючи ефективність методу. При рециркуляції продуктів згоряння їх вплив на утворення оксидів азоту тим вище, чим вище максимальна температура у зоні горіння та чим краще перемішування всього обсягу палива й баласту до зони горіння. Найбільш ефективним баластом, що знижує утворення NO при горінні, є діоксид вуглецю за умови його гарного попереднього молекулярного перемішування з природним газом до зони горіння. *Бібл. 16, рис. 2, табл. 4.*

**Ключові слова:** оксиди азоту, рециркуляція, баласт, горіння, діоксид вуглецю.

**Sigal I.Ya.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Smikhula A.V.<sup>1</sup>**,  
Candidate of Technical Sciences, **Sigal O.I.<sup>2</sup>**, Candidate of Technical Sciences,  
**Marasin O.V.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, **Kernazhytska E.S.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**

39, Degtjarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

<sup>2</sup> **Institute of Engineering Thermophysics of National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kiev**

2-a, Zhelyabova Str., 03057 Kiev, Ukraine, e-mail: office@engecology.com

## **Features of the Influence of Recirculation of Combustion Products on the Formation of Nitrogen Oxides in Boilers During Burning Natural Gas**

During the combustion of natural gas and the supply of exhaust gases recirculation like a ballast was shown. It is necessary to take into account that they contain nitrogen oxides, mainly in the form of NO, which does not decompose in the combustion zone, but is added to nitrogen oxides that has been produced during burning of fuel. The combustion products are affordable, but not ideal ballast. As on the one side, they reduce the maximum temperature in the combustion zone and the concentration of reagents, i.e. reduces the formation of «thermal» NO<sub>x</sub>, on the other side, they add to the combustion zone an additional amount of nitric oxide, which is summed up with that has been formed during

burning in the combustion chamber and also reducing the efficiency of the method. When the maximum temperature in the combustion zone is the highest and the entire volume of fuel and ballast before to the combustion is best mixed during recirculation of exhaust gases, their effect on the formation of nitrogen oxides is the highest. The most effective ballast that reduces the formation of NO during combustion is carbon dioxide, provided it is well pre-molecularly mixed with natural gas before to the combustion zone. *Bibl. 16, Tab. 4, Fig. 2.*

**Key words:** nitrogen oxides, recirculation, ballast, combustion, carbon dioxide.

### References

1. Sigal I.Ya. [Protection of ambient air at fuel burning]. Leningrad : Nedra, 1988. 313 p. (Rus.)
2. Sigal I.Ya., Duboshiy A.N., Sigal O.I., Smikhula A.V. [The efficiency increase of smoked gases recirculation influence on nitrogen oxides emission from power plant boilers reduction]. *Energotehnologii i resursosberezhnie [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2010. No. 1. pp. 48–52. (Rus.)
3. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy O.M., Horbunov O.V., Horbunov A.O. [Reducing the formation of nitrogen oxides during the combustion of natural gas]. *Energotehnologii i resursosberezhnie [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2016. № 4. pp. 44–51. (Rus.)
4. Roslyakov P.V. *Metody zashchity okruzhayushchey sredy [Methods of Environmental Protection: Textbook for Higher Schools]*. Moscow : Publ. of MEI, 2007. 336 p. (Rus.)
5. Kotler V.R. [Nitrogen oxides in the flue gas boilers]. Moscow : Energoatomizdat, 1987. 144 p. (Rus.)
6. Soroka B.S., Horupa V.V. Analysis of the Process of Condensation of Gas Atmospheres and Combustion Products. *Energotehnologii i resursosberezhnie [Energy Technologies & Resource Saving]*. 2017. № 1. pp. 3–18. (Rus.)
7. Khodakov Yu.S. [Nitrogen Oxides and Power Industry : Problems and Solutions]. Moscow : OOO «Эст.-М», 2001. 432 p. (Rus.)
8. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [Reducing emissions of nitrogen oxides in the gas boiler by flue gas recirculation]. *Prom. Heat, Heat Engineering*. 2009. 31 (4). pp. 5–11. (Rus.)
9. Sigal O.I., Bykoriz E.Y. Vplyv volohy, yak skladovoi topkovykh balastiv na protses utvorennia okslyiv azotu [The effect of moisture, as a component of gas ballast of furnace on the formation of nitrogen oxides]. In: *Problemi ekologii i ekspluatacii obektiv energetiki*. Sevastopol, 2005. pp. 37–44. (Ukr.)
10. Ricou F.P., Spalding D.B. Measurements of entrainment by asymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. 11 (1). pp. 21–32.
11. Abramovich G.N., Krashennnikov S.Iu., Sekundov A.N., Smirnova I.P. [Turbulent mixing of gas jets]. Moscow : Nauka, 1974. 272 p. (Rus.)
12. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. *Okisleniye azota pri gorenii [Formation of Nitric Oxide Following Combustion]*. Moscow : Acad. Sci., SSSR, 1947. 145 p. (Rus.)
13. Sigal I.Ya., Duboshiy O.M. Intensifikacija metodov snizheniya obrazovaniya oksidov azota v kotlah [Intensification of methods to reduce the formation of nitrogen oxides in boilers]. *Probl. teplojenerg. Mater. 8th Vses. simp. po goreniju i vzryvu*, Tashkent, 13–17 Oct. 1986. Chernogolovka, 1986. pp. 52–55. (Rus.)
14. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. Thirteenth Symposium on Combustion. Pittsburgh: Combustion. inst., 1971, P. 373-380.
15. Sigal I.Ya., Markovskiy A.V., Nizhnik S.S., Gurevich N.A. Obrazovanie oksidov azota v topkakh kotelnykh agregatov [Formation of nitrogen oxides in boiler furnaces]. *Teploenergetika*. 1972. No. 4. pp. 57–60. (Rus.)
16. Chojnacki, D. Developments in Ultra-Low NO Burner/Boilers. *Proceedings of the 1992 International Gas Research Conference*. Orlando, Florida, 1992. pp. 351-361.

Received October 1, 2018