

## Охрана окружающей среды

УДК 621.18:632.15

### Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выбросов оксидов азота котлами электростанций

*Сигал И.Я.<sup>1</sup>, Дубоший А.Н.<sup>1</sup>, Сигал А.И.<sup>2</sup>, Смихула А.В.<sup>1</sup>*

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

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

Проведены исследования влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выбросов оксидов азота котлами электростанций. Определены наиболее эффективные способы ввода газов рециркуляции в топочную камеру котлоагрегатов. Установлено, что эффективными средствами усиления воздействия газов рециркуляции на образование оксидов азота являются ввод газов рециркуляции в топливный газ (при сжигании газа) и перераспределение газов рециркуляции с увеличением их доли на центральные горелки.

**Ключевые слова:** котлы электростанции, оксиды азота, рециркуляция дымовых газов.

Проведено дослідження впливу рециркуляції димових газів на зниження викидів оксидів азоту котлами електростанцій. Визначено найбільш ефективні способи введення газів рециркуляції в топкову камеру котлоагрегатів. Встановлено, що ефективними засобами посилення дії газів рециркуляції на утворення оксидів азоту є введення газів рециркуляції в паливний газ (при спалюванні газу) та перерозподіл газів рециркуляції із збільшенням їх частки на центральні пальники.

**Ключові слова:** котли електростанції, оксиди азоту, рециркуляція димових газів.

Оксиды азота на 95–98 % определяют токсичность продуктов сгорания котлов электростанций на природном газе и на 40–50 % котлов на угле и мазуте. Поэтому снижение выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу в решающей мере позволяет уменьшить загрязнение атмосферного воздуха, что особенно существенно при расположении энергоблоков в городах (Киевские ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6, Харьковская ТЭЦ-5), или большой единичной мощности электростанций.

Образование оксида азота в зоне горения при сжигании традиционных топлив достаточно

изучено и может происходить по четырем известным механизмам [1–3]. Из методов, которыми снижают образование  $\text{NO}$  в зоне горения, наиболее хорошо изучена рециркуляция продуктов сгорания в топочную камеру. Эффективность применения рециркуляции для снижения образования  $\text{NO}$  подтверждена многими работами [2–10]. Применение рециркуляции позволяет регулировать теплоотдачу к топочным экранам и температуру перегрева пара, сближать характеристики работы котлов при сжигании различных топлив, например, жидких и газооб-

**Таблица 1. Уровень токсичности ( $\Gamma_{\text{усл}} = C/\text{ПДК}^{\text{М.Р}}$ ) дымовых газов котла ТГМП-314А при сжигании мазута**

Показатель	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Сажа	CO	КС
C <sub>ср</sub> *, мг/м <sup>3</sup>	4000	600–700	75–150	0–500	(2–3)·10 <sup>-4</sup>
ПДК в воздухе, мг/м <sup>3</sup>	0,5	0,085	0,15	5,0	10 <sup>-6</sup>
$\Gamma_{\text{усл}}$	8000	7000–8000	500–1000	100	200–300

\* Средние концентрации компонентов в дымовых газах. КС – канцерогенные соединения.

разных, поддерживать температуру перегрева пара при изменении нагрузки. Ввод газов рециркуляции в топочную камеру приводит к незначительному снижению КПД котла (0,01–0,03 % на 1 % газов рециркуляции), но открывает большие возможности унификации котлов по топливу.

В 1970–1980-х гг. Институтом газа НАН Украины и Всесоюзным (с 1991 г. Всероссийский) теплотехническим институтом был завершен цикл исследований по подаче газов рециркуляции в дутьевой воздух с целью снижения выбросов NO<sub>x</sub> [2], и на основании этих исследований большинство газомазутных ТЭС было переведено на такой режим эксплуатации мощных энергоблоков. Для реализации этого метода необходимо оборудовать котел специальным рециркуляционным дымососом и смонтировать газоходы (в котлах энергоблоков это оборудование уже имеется). Основными недостатками подачи газов рециркуляции является повышение сопротивления воздушного тракта, увеличение нагрузки на дымососы, появление сажи и оксида углерода при чрезмерной степени рециркуляции [2, 11].

Обычно дымовые газы с температурой 300–400 °С отбираются перед воздухоподогревателем и специальным рециркуляционным дымососом подаются в топочную камеру. При этом условия ввода раньше были различными. В некоторых случаях газы подавались через каналы в поду топки (котел ТГМП-314), через шлицы под горелками (ТГМП-114), через кольцевой канал вокруг горелки или в воздуховод (ТГМП-324). При подаче газов рециркуляции с температурой 300–340 °С в ядро факела в количестве 20 % от объема воздуха, поступающего на горение, максимальная температура факела снижается обычно на 393–403 °С, а это позволяет снизить выход NO<sub>x</sub> на 40–50 % [2].

На Киевской ТЭЦ-5 были проведены комплексные исследования по пяти компонентам: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, саже, СО, канцерогенным соединениям вредных выбросов котла ТГМП-314А производительностью 950 т/ч пара (энергоблок 250/300 МВт) — при сжигании высокосерни-

того мазута (S<sub>p</sub> = 2,4 %) в зависимости от режимных и конструктивных характеристик в обычных эксплуатационных условиях работы, и по уровню токсичности дымовых газов, создаваемому каждым из этих веществ (табл.1). Суммарный уровень токсичности дымовых газов котла, определяемый как сумма отношений концентрации данного вещества в дымовых газах к предельно допустимой максимально-разовой концентрации в атмосферном воздухе населенных мест (ПДК<sup>М.Р</sup>), составляет 16000–18000, а главными компонентами, определяющими вредность выбросов при сжигании высокосернистого мазута, являются диоксид серы и оксиды азота.

С целью усиления влияния рециркуляционных газов на зону горения произведена реконструкция горелок: кольцевая коническая насадка, отделяющая поток рециркуляционных газов от топливно-воздушной смеси, была укорочена. При этом рециркуляционные дымовые газы смешиваются с дутьевым воздухом и попадают непосредственно в зону горения, более интенсивно охлаждая ее. При работе котла с реконструированными горелками отмечено более эффективное снижение NO<sub>x</sub> при увеличении степени рециркуляции дымовых газов. Повышение степени рециркуляции от 5 до 24 % снижает содержание NO<sub>x</sub> в дымовых газах на 57 %, то есть каждый 1 % повышения степени рециркуляции снижает выход NO<sub>x</sub> на 2,5–3,0 %.

В табл.2 показано влияние коэффициента расхода воздуха (α) и степени рециркуляции дымовых газов (γ) на уровень токсичности дымовых газов котла ТГМП-314А при сжигании мазута при разных схемах ввода рециркуляционных газов. Увеличение выброса сажи при повышении степени рециркуляции незначительно, а в некоторых случаях концентрация С, СО и С<sub>20</sub>Н<sub>12</sub> даже снижается за счет увеличения концентрации радикалов Н и ОН в зоне горения [2].

**Таблица 2. Уровень токсичности дымовых газов котла ТГМП-314А при сжигании мазута**

α	γ, %	Уровень токсичности $\Gamma_{\text{усл}}$					сумма
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	сажа	CO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	
По кольцевому каналу вокруг горелки							
1,03	0	8000	7000	800	200	350	16350
1,06	0	8000	8900	200	0	100	17200
1,09	0	8000	10000	–	–	–	18000
Непосредственно в горелку							
1,03	24	8000	3050	1000	200	350	12600
1,06	24	8000	3900	250	0	100	12250
1,09	24	8000	4350	100	–	–	12450

**Таблица 3. Зависимость выхода  $\text{NO}_x$  и КПД котла КВГМ-180 от степени рециркуляции дымовых газов**

Наименование	Нагрузка 92–96 %			Нагрузка 63 %		
	без рециркуляции	с рециркуляцией	с рециркуляцией	без рециркуляции	с рециркуляцией	с рециркуляцией
Теплопроизводительность, Гкал/ч	165,9	168,7	173,5	112,7	112,7	112,7
Степень рециркуляции, %	0	30	50	0	20	30
Температура уходящих газов, °С	164	180	181	117	130	150
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,35	1,35	1,33	1,23	1,24	1,21
Потери тепла с уходящими газами, %	8,22	9,00	8,92	5,22	5,86	5,93
Концентрация $\text{NO}_x$ , приведенная к $\alpha = 1$ , мг/м <sup>3</sup>	330	110	100	120	55	45
Снижение $\text{NO}_x$ , %	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

Таким образом, рециркуляция дымовых газов в топку в сочетании с рациональной схемой ввода газов в зону горения является эффективным способом снижения концентрации  $\text{NO}_x$  и суммарного уровня токсичности продуктов сгорания топлива.

Для малых котлов, где рециркуляционный дымосос отсутствует, опробована и получила положительную оценку система рециркуляции газов вследствие подачи их на всасывающий патрубок дутьевого вентилятора (рис.1,б) [10].

Рециркуляция продуктов сгорания (в дутьевой воздух или в горелку) может эффективно применяться при сжигании газа, мазута и с некоторыми особенностями угля. Эффективность рециркуляции тем больше, чем выше температура в зоне горения. Она снижается при: а) уменьшении нагрузки котла; б) увеличении коэффициента избытка воздуха; в) уменьшении температуры горения топлива. Максимальная эффективность рециркуляции имеет место при сжигании природного газа при максимальной нагрузке топочной камеры и малых значениях  $\alpha$ .

Для проверки влияния рециркуляции дымовых газов в дутьевой воздух на КПД котлов был выбран котел КВГМ-180, установленный на ТЭЦ в «Киевэнерго». Из табл.3 видно, что снижение КПД сравнительно небольшое (0,6–0,8 %) и в то же время именно при максимальной нагрузке котлов энергоблоков рециркуляцию обычно снижают до 2–3 % на газе и 8–10 % на мазуте, главным образом, из-за перегрузки тягодутьевых устройств. Это приводит к росту выброса  $\text{NO}_x$  на максимальной нагрузке. Поэтому важным является поиск методов увеличения воздейст-

вия газов рециркуляции на образование и выброс  $\text{NO}_x$ , чтобы была возможность существенно снизить их при сравнительно небольших количествах газов рециркуляции.

Исследования образования  $\text{NO}$  в турбулентном факеле [12] показали, что при длине турбулентного факела газогорелочных устройств  $\bar{L}_\Phi = 10$  ( $\bar{L}_\Phi = L_\Phi/D$ , где  $D$  — диаметр амбразуры горелки) образование  $\text{NO}_x$  фактически заканчивается на длине  $\bar{L}_\Phi = (2,5–3,0)$  [2] для прямооточного факела, а у вихревого сдвигается к устью горелки:

$$\bar{L}_\Phi \approx 2,7 \sin \beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  — угол подъема факела по спирали.

Поэтому существенное снижение выхода  $\text{NO}_x$  будет иметь место при влиянии балласта на вещества, вступающие в реакцию на начальном участке факела. Действительно, при подаче газов рециркуляции в природный газ снижение выхода  $\text{NO}_x$  на 1 % газов рециркуляции (А) со-

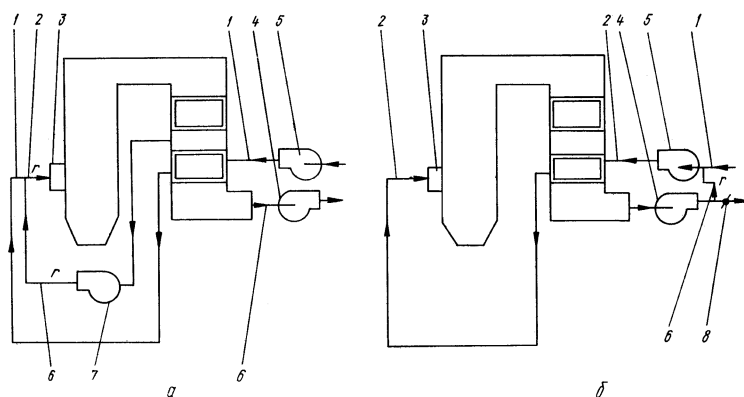


Рис.1. Схема подачи рециркуляционных газов в дутьевой воздух с помощью рециркуляционного дымососа (а) и саморегулирующей (б): 1 — воздух; 2 — смесь воздуха и дымовых газов; 3 — горелочное устройство; 4 — дымосос; 5 — вентилятор; 6 — дымовые газы; 7 — рециркуляционный дымосос; 8 — шибер.

**Таблица 4. Сравнение способов подачи газов рециркуляции в топку**

Способ подачи газов рециркуляции в топку	A, %
В топливо	4,5–6,0
В первичный воздух	3,0–3,5
В общий канал дутьевого воздуха	2,5–3,0
По кольцевому каналу вокруг горелки	1,2–1,5
Через шлицы напротив нижнего яруса горелок	1,0
Через шлицы под горелками	0,8–1,0
Через шлицы в поду топки	0,2

ставляет 4,5–6 %, что примерно в 2 раза выше, чем при подаче газов рециркуляции в дутьевой воздух (табл.4), хотя значительная часть воздуха участвует в реакциях до зоны максимальных температур.

Здесь A характеризует усредненное удельное снижение (% на 1 % r) при рециркуляции продуктов сгорания:

$$A = (NO_x - NO'_x) \cdot 100 / (r NO_x), \quad (2)$$

где  $NO_x, NO'_x$  – соответственно концентрация  $NO + NO_2$  без рециркуляции и с рециркуляцией; r – степень рециркуляции, %.

В работе [13] впервые была предложена и исследована подача газов рециркуляции в природный газ и показана эффективность этого метода. В 1999–2000 гг. Институтом газа впервые разработано, изготовлено и введено в эксплуатацию на Северо-Донецкой ТЭЦ мощное газогорелочное устройство котла производительностью по пару 100 т/ч, в котором осуществлено предварительное смешение 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), что в первом приближении можно объяснить тем, что до зоны образования  $NO_x$

реагирует все топливо, однако не весь воздух, а лишь его часть [13].

Если принять до значений  $r = 10\%$  линейную зависимость  $NO_x$  от r, то по эффективности эти способы могут быть расположены в последовательности, представленной в табл.4.

Вторым методом повышения эффективности воздействия газов рециркуляции на образование  $NO_x$ , которое исследовано Институтом газа НАН Украины [13], Московским энергетическим институтом [14], является перераспределение газов рециркуляции с увеличением их доли на центральные горелки. На энергоблоках мощностью 200 и 300 МВт исследовалась интенсификация рециркуляции дымовых газов вследствие повышения воздействия газов рециркуляции на центральные зоны топочной камеры (рис.2) [13].

Топка котла ТГМП-314А оборудована 16 горелками, размещенными на фронтальной и задней стенах в два яруса (по 8 шт.). При равномерной раздаче газов рециркуляции по всем 16 горелкам  $r_{кр}/r_{ц} = 1$ , не изменяя общего расхода газов рециркуляции, увеличивали их подачу на центральные 8 горелок, соответственно снижая расход на крайние. При соотношении расхода газов рециркуляции  $r_{кр}/r_{ц} = 0,2$  выход  $NO_x$  снижался на 27 %, а температура перегрева пара оставалась в допустимом диапазоне ( $T_{пер} = 555–560\text{ }^\circ\text{C}$ ). При дальнейшем увеличении расхода газов рециркуляции на центральные горелки  $r_{кр}/r_{ц} < 0,2$  выход  $NO_x$  не уменьшался, кроме того, в результате значительного охлаждения центральной части топочной камеры в дымовых газах появились продукты неполного сгорания.

При заданной степени рециркуляции дымовых газов повышение их подачи на центральные горелки ( $r_{ц}$ ) и соответствующее снижение подачи на крайние до отношения  $r_{кр}/r_{ц} = 0,2$  уменьшает выход  $NO_x$  на 25–30 % по сравнению с равномерной подачей газов рециркуляции на все горелки.

### Выводы

Эффективность влияния рециркуляции на образование  $NO_x$  тем больше, чем выше температура в зоне горения. Она снижается при: а) уменьшении нагрузки котла; б) увеличении коэффициента избытка воздуха; в) уменьшении температуры горения топлива.

Перспективными методами повышения эффективности снижения образования  $NO_x$  при сжигании топлива в котлах электростанций, при которых возможно обеспечить снижение  $NO_x$  на 60–70 %, являются: а) подача газов ре-

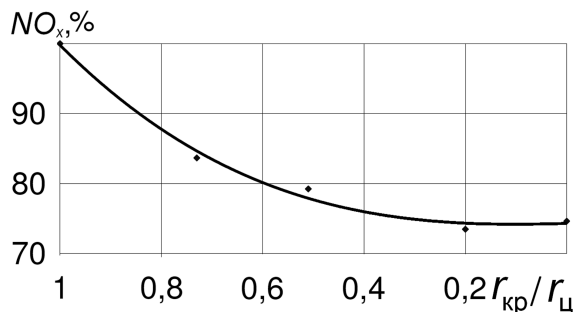


Рис.2. Снижение концентрации  $NO_x$  в продуктах сгорания при неравномерной подаче газов рециркуляции в центральные  $r_{ц}$  и крайние  $r_{кр}$  горелки.

циркуляции в топливо (при сжигании природного газа); б) усиление воздействия газов рециркуляции увеличением их доли на центральные горелки и соответствующим снижением на крайние, что способствует снижению пика температур в центральной зоне топочной камеры (при сжигании природного газа и мазута).

При сжигании углей 30–40 %-го снижения образования  $\text{NO}_x$  следует добиваться методами ступенчатого сжигания, которые для разного вида углей, топок, количества и расположения горелок могут существенно различаться.

### Список литературы

1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: Физматлит, 2003. — 351 с.
2. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л.: Недра, 1988. — 313 с.
3. Сигал И.Я., Дубоший А.Н., Смихула А.В. Снижение выброса оксидов азота котлами электростанций // Энергетика и электрификация. — 2005. — № 1. — С. 31–35.
4. Глебов В.П., Мотин Г.И., Сигал И.Я. и др. Окислы азота в дымовых газах при циклонном и горелочном сжигании высокосернистого мазута // Теплоэнергетика. — 1972. — № 10. — С. 5–7.
5. Сигал И.Я. Оксиды азота в продуктах сгорания топлива и в атмосферном воздухе // Хим. технология. — 1985. — № 5. — С. 54–56.
6. Тагер С.А., Калмару А.М., Кузнецов Н.И. Образование окислов азота в газомазутном котлоагрегате ТГМП-324 // Теплоэнергетика. — 1973. — № 10. — С. 42–46.
7. Rawdon A.H., Sadowski R.S. An experimental correlation of oxides of emissions from power boilers based on field data // Trans. of the ASME. — 1973. — № 3. — P. 32–39.
8. Крыжановский В.Н., Косинов О.И., Гуревич Н.А., Сигал И.Я. Влияние способа сжигания газообразного топлива на образование окиси азота // Газов. пром-сть. — 1974. — № 11. — С. 53–54.
9. Залогин Н.Г., Кропп Л.И., Кострикина Ю.М. и др. Энергетика и охрана окружающей среды. — М.: Энергия, 1979. — 351 с.
10. Сигал И.Я., Нижник С.С. Зменшення утворення оксидів азоту рециркуляцією продуктів згорання // Цукор України. — 1994. — № 3. — С. 14–16.
11. Горбаненко А.Д., Цирульников Л.М., Красносельцов Г.К. О механическом недожоге жидкого топлива в топочных камерах // Электр. станции. — 1964. — № 10. — С. 19–21.
12. Сигал И.Я., Гуревич Н.А. Закономерности горения в закрученном потоке и длина факела вихревых газовых горелок // Газов. пром-сть. — 1968. — № 5. — С. 35–37.
13. Сигал И.Я., Дубоший А.Н. Интенсификация методов снижения образования окислов азота в котлах // Химическая физика процессов горения и взрыва. Проблемы теплоэнергетики: Материалы VIII Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, Черногоровка, 1986 г. — Черногоровка, 1986. — С. 52–55.
14. Росляков П.В., Егорова Л.Е., Ионнин И.Л. Технологические мероприятия по снижению вредных выбросов ТЭС в атмосферу. — М.: МЭИ, 2001. — 50 с.

Поступила в редакцию 25.09.09

## The Efficiency Increase of Smoked Gases Recirculation Influence on Nitrogen Oxides Emission from Power Plant Boilers Reduction

*Sigal I.Ya.<sup>1</sup>, Duboshiy A.N.<sup>1</sup>,  
Sigal O.I.<sup>2</sup>, Smikhula A.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> The Gas Institute of NASU, Kiev

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of NASU, Kiev

The investigation of smoked gases recirculation efficiency influence on nitrogen oxides emission from power plant boilers is conducted. The main effective methods of smoked recirculation gases injection into the furnace of power plant boilers are determined. It is established that the most effective method of smoked recirculation gases effect on nitrogen oxides formation increase is the gases injection into fuel gas (by natural gas combustion) and the gases redistribution with they part on central burners increase.

**Key words:** power plant boilers, nitrogen oxides, smoked gases recirculation.

Received September 25, 2009