8. А л е к с а н д р о в, А. А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А. А. Александров. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

9. Х р у с т а л е в, Б. М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. / Б. М. Хрусталев, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч. 2.

10. Р а в и ч, М. Б. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – М.: Наука, 1977.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т БНТУ Поступила 28.12.2012

УДК 621

# АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ $NO_x$ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

**Канд. техн. наук КАБИШОВ С. М., докт. техн. наук, проф. ТРУСОВА И. А., канд. техн. наук, доц. РАТНИКОВ П. Э., канд. техн. наук МЕНДЕЛЕВ Д. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

В последние годы необходимость существенного снижения выбросов вредных веществ в атмосферу теплоэнергетическими установками, по крайней мере, до уровня, регламентированного ГОСТ 30735–2001, привела к использованию как конструктивных, так и технологических методов подавления образования оксидов азота. Почти все технологические методы подавления $NO_x$ проверены в промышленных условиях и опубликованы в отечественной и зарубежной технической литературе, например в [1–7]. В частности, по данным Агентства по защите окружающей среды США (EPA US) [1, 5], в некоторых штатах требуется в обязательном порядке внедрять на действующих котлах наилучшие из известных технологий – BAT (Best Available Technologies), которые включают:

- снижение избытка воздуха (LEA);
- ступенчатый ввод воздуха, который предполагает не только ступенчатое сжигание (OFA), но также и нестехиометрическое сжигание (BBF) и отключение одной или нескольких верхних горелок (BBOS);
- рециркуляцию дымовых газов FRG (обычно подача газов рециркуляции требует незначительных изменений горелочных устройств);
- ступенчатый ввод топлива, т. е. организацию трехступенчатого сжигания (reburning-process);
- использование малотоксичных горелочных устройств (LNB), которые включают в себя горелки: со ступенчатой подачей воздуха, с рециркуляцией и со ступенчатым вводом топлива (т. е. организация reburning-process в факеле отдельно взятой горелки);
- ввод в рабочее пространство котла водяного пара или аммиачного раствора с целью восстановления оксидов азота.

В табл. 1 приведены сравнительные данные по эффективности применения различных технологических способов снижения выбросов $NO_x$ по данным [5].

*Таблица 1*

**Технологические способы снижения выбросов $NO_x$**

| Метод | Степень снижения $NO_x$, % | Топливо | Ограничение применения | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Сжигание с избытком воздуха меньше единицы | 10–44 | Все виды топлива | Неполное сгорание, повышенный расход топлива, повышенное содержание CO и горючих | Снижение $NO_x$ во многом зависит от величины выбросов до внедрения метода. В этом случае, возможно, достаточно уплотнить топку, чтобы снизить избыток воздуха |
| Ступенчатый ввод воздуха в топку:<br>1) отключение горелки | 10–65 | Газ и мазут | | Возможны проблемы с подачей топлива, так как то же количество топлива должно быть подано в топку через меньшее число горелок |
| 2) нестехиометрическое сжигание | | Все виды топлива | | |
| 3) двухступенчатое сжигание | | | | Требуется развести экранные трубы для установки воздушных сопл |
| Введение в факел котла водяного пара и аммиака | 20–30 | Газ и мазут | | |
| Рециркуляция дымовых газов | 20–50 (50 % для газа в сочетании с OFA) | Все виды топлива | Нестабильность факела | Этот метод может сочетаться со ступенчатым вводом воздуха. Требуется дополнительный расход электроэнергии на дымосос рециркуляции |
| Ступенчатый ввод топлива | 50–60 (может быть восстановлено 70–80 % $NO_x$, образовавшихся в первичной зоне) | Все виды топлива | | Reburning-process совместим с другими первичными методами снижения $NO_x$; простота установки технологии, потребление незначительного количества дополнительной энергии |
| Малотоксичные горелки и:<br>1) ступенчатый ввод воздуха | 25–30 | Все виды топлива | Нестабильность факела, неполное горение | Малотоксичные горелки могут использоваться в комбинации с другими первичными методами, такими как OFA, FGR и reburning-process |
| 2) рециркуляция дымовых газов | До 20 | | Нестабильность факела | Малотоксичные горелки в сочетании с OFA могут дать до 70 % снижения $NO_x$ |
| 3) ступенчатый ввод топлива | 50–60 | | Нестабильность факела, неполное горение | Недостатком малотоксичных горелок является потребность в пространстве для разделения факела |

Далее в статье приведены результаты внедрения различных технологических (режимных) способов снижения выбросов $NO_x$ на действующих теплоэнергетических установках Республики Беларусь и Российской Федерации. Наиболее опробованным из всех известных способов подавления образования оксидов азота является рециркуляция дымовых газов. Ее на котлах более полувека назад стали использовать в качестве средства борьбы со шлакообразованием и для повышения температуры перегрева пара. Тогда же выяснилось, что рециркуляция – одно из эффективных средств подавления генерации оксидов азота. Так, в эксплуатируемых в настоящее время в Республике Беларусь котлах сверхвысокого давления (СВД) и сверхкритического давления (СКД) рециркуляция должна была обеспечить проектный перегрев пара при сжигании мазута. При этом возникал мощный азотоподавляющий эффект [8]. Например, на котлах ТГМП-314 энергоблоков мощностью 300 МВт рециркуляция позволяет снизить генерацию оксидов азота с 240 до 60 ppm.

Авторами [2] проведен комплекс сравнительных исследований работы газомазутного котла ТГМП-344А при обычном и ступенчатом сжигании газа и мазута. Применение ступенчатого сжигания топлива, согласно этим исследованиям, приводит к уменьшению выбросов $NO_x$ до 100 мг/м$^3$ при работе на газе и до 250 мг/м$^3$ – на мазуте. При этом доля рециркуляции газов в горелки составляет 20–22 %, а третичного воздуха – 25–28 %. Было проведено 32 опыта по изучению влияния ступенчатого сжигания на теплообменные процессы в топке и установлено, что при ступенчатом сжигании влияние коэффициента избытка воздуха на выходную температуру в топке более существенно, чем при обычном сжигании. Рециркуляция газов на тепловую работу топки оказывает гораздо меньшее влияние.

Глубокое снижение выбросов оксидов азота было получено по данным исследований сотрудников Московского энергетического института [4], в работе которых представлены результаты внедрения ступенчатого режима сжигания топлива и рециркуляции продуктов сгорания на котле БКЗ-420-140НГМ Нижегородской ГРЭС компании «Нижновэнерго». На этом котле по разработке МЭИ были смонтированы восемь плоских сопл вторичного воздуха, размещенных на фронтальном экране с большим наклоном вниз. Благодаря сочетанию указанной технологии ступенчатого сжигания природного газа и вводу продуктов рециркуляции в общий короб горячего воздуха удалось снизить выбросы $NO_x$ с 260 до 35 мг/м$^3$ при увеличении доли рециркуляции от 0 до 33 %. Однако следует отметить, что при этом снизилась нагрузка котла с 390 до 30 т/ч. Близкие результаты при использовании ступенчатого сжигания и рециркуляции газов были получены на котле БКЗ-420-140НГМ Дзержинской ТЭЦ: в этом случае образование оксидов азота снизилось до 80 мг/м$^3$.

В [9] приведены результаты исследования способа сжигания природного газа в рабочем пространстве печи при добавлении в корень факела водяных паров. Было установлено, что добавление водяного пара в количестве 0,06–0,12 кг на 1 м$^3$ природного газа позволяет повысить производительность печи, снизить удельный расход топлива и содержание оксидов азота в отходящих газах с 700 до 470 ppm (уменьшение содержания оксидов азота происходит вследствие падения скорости реакции их образования при подаче водяного пара).

Снижения эмиссии оксидов азота за счет внедрения режимных мероприятий, не требующих внесений изменений в конструкцию котла БКЗ-160-100, удалось добиться и на Саровской ТЭЦ [6]. Были реализованы такие мероприятия, как нестехиометрическое сжигание топлива (распределение топлива или воздуха по ярусам горелок), упрощенное двухступенчатое сжигание, состоящее в отключении части горелок верхнего яруса при сохранении в них расхода воздуха. Указанные мероприятия позволили снизить выбросы $NO_x$ с 1250 до 800 мг/м$^3$.

В [7] приводятся результаты применения некоторых методов снижения выбросов оксидов азота на ПГУ-170 Невинномысской ГРЭС, предложенных сотрудниками ОАО «Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского». Данный парогазовый энергоблок содержит два корпуса высоконапорного парогенератора ВПГ-450, работающего на природном газе. Концентрации оксидов азота даже в наиболее характерном режиме сжигания газа в данной установке составляют около 1100 мг/м$^3$. По предложению ОАО «ЭНИН» на этом агрегате для снижения образования $NO_x$ был опробован ряд мероприятий, начиная с менее затратного – ввода водяного пара в воздухопроводы горячего воздуха. В указанных воздухопроводах были смонтированы парораспределительные решетки для равномерного распределения пара по сечению. Было показано, что введение 7,5 т/ч пара позволяет снизить выброс $NO_x$ на 20 %. Поскольку полученный эффект снижения концентрации $NO_x$ рассмотренным способом оказался недостаточным, было решено опробовать некаталитическое селективное восстановление оксидов азота с использованием аммиака в области температур (950–1000) °С. Данный метод требует для своей реализации сравнительно небольших инвестиций и может обеспечивать снижение эмиссии $NO_x$ до 50 %. Была смонтирована установка, в которой в качестве источника аммиака использовали 25%-й водный раствор аммиака (расход аммиачной воды – от 70 до 290 кг/ч). Благодаря этому удалось снизить образование $NO_x$ на 550–640 мг/м$^3$.

Следует отметить, что почти все приведенные способы в некоторой степени позволяют снизить негативное влияние таких факторов, как высокая температура в зоне горения, избыток радикалов кислорода, понизить температуру в топочной камере. Однако при этом не уделено внимание одной из основных причин образования $NO_x$ – концентрации азота в исходной смеси газов.

Основным источником азота при сжигании природного газа является воздух. Такие методы, как нестехиометрическое сжигание топлива, ступенчатая подача окислителя в зону горения и т. п., отчасти позволяют решить задачу уменьшения концентрации азота в локальных высокотемпературных участках факела и при этом снизить температуру горения, что также положительно отражается на объемах выбросов $NO_x$. Но данные способы имеют ограничения, определяемые стабильностью процесса горения. Уменьшение количества воздуха в зоне горения приводит к снижению и количества кислорода.

В последнее время в энергетике и промышленности с целью повышения тепловой эффективности работы агрегатов и снижения выбросов $NO_x$ при сжигании природного газа применяется обогащение дутья кислородом.

Этот метод хорошо зарекомендовал себя при работе промышленных нагревательных печей, например, по данным [10], использование дутья, обогащенного кислородом до 35,0 %, позволяет снизить топливопотребление на 3,5 % и уменьшить выбросы $NO_x$ на 5,0–10,0 %. Приведем анализ воздействия повышенной концентрации кислорода в воздухе на процесс образования оксида азота.

Согласно теории Я. Б. Зельдовича [11], равновесная концентрация оксидов азота, образующихся при горении углеводородных топлив, может быть рассчитана по формуле

$$[C_{NO}] = 4,6\sqrt{C_{N_2} C_{O_2}}\,\exp[-21500/(RT)], \qquad (1)$$

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

Расчеты, выполненные по формуле (1), показывают, что с ростом концентрации кислорода в исходной смеси повышается 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 (рис. 1).

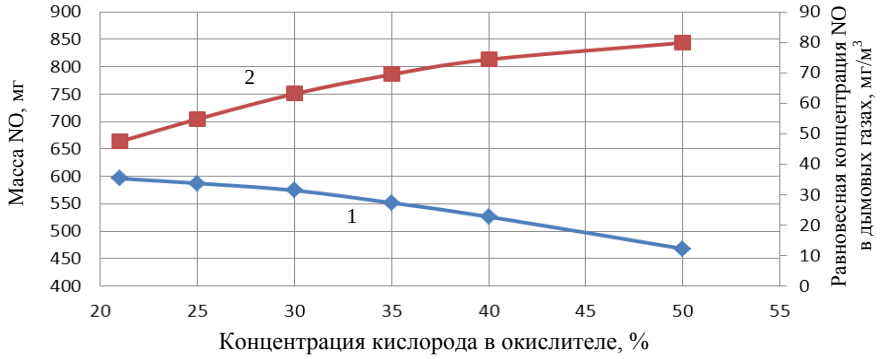


*Рис. 1.* Зависимость концентрации NO и объема его выбросов при сжигании 1 м$^3$ природного газа от концентрации кислорода в исходной смеси «воздух – кислород»: 1 – масса NO при сжигании 1 м$^3$ газа, мг; 2 – равновесная концентрация NO в продуктах сгорания, мг/м$^3$

Из рис. 1 очевидно, что по мере увеличения содержания кислорода в исходной смеси, при прочих равных условиях, объем $NO_x$ в продуктах сгорания уменьшается. Уже при концентрации кислорода 40 % в подаваемом на горение воздухе объем выбросов $NO_x$ сокращается на 12,0 %, а при повышении содержания кислорода до 50 % – на 21,5 %.

## ВЫВОДЫ

1. Для решения экологических проблем, возникающих при работе действующего теплоэнергетического оборудования (особенно при отсутствии

резерва мощности у предприятия и инвестиций), целесообразно остановиться на комплексе режимных мероприятий, приводящих к снижению $NO_x$. Эти мероприятия (табл. 1) не требуют больших финансовых затрат, при правильной реализации не ухудшают технико-экономические показатели котлов и позволяют подавить образование оксидов азота на 30–60 %.

2. С точки зрения экологии целесообразно применение кислорода при сжигании топлива в котлах и промышленных печах, что позволит существенно сократить объемы выбросов $NO_x$ в окружающую среду.

## ЛИТЕРАТУРА


1. First Annual Top Plants Survey. – 2002. – Vol. 146, № 5.

2. Абрютин, А. А. Исследование влияния ступенчатого сжигания топлива на теплообмен в топках газомазутных котлов / А. А. Абрютин, В. В. Чупров // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 54–61.

3. Тумановский, А. Г. Перспективы решения экологических проблем тепловых электростанций / А. Г. Тумановский, В. Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 2007. – № 6. – С. 5–11.

4. Расширение технологических возможностей схем рециркуляции продуктов сгорания на газомазутных котлах / В. В. Ульянов [и др.] // Электрические станции. – 2005. – № 5. – С. 30–35.

5. Котлер, В. Р. Использование газа на тепловых электростанциях США и проблемы экологии / В. Р. Котлер, С. Е. Беликов, В. А. Верещетин // Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 66–68.

6. Курочкин, А. В. Уменьшение выбросов оксидов азота за счет режимных мероприятий при сжигании природного газа / А. В. Курочкин, А. Ф. Беляев, С. Е. Беликов // Промышленная энергетика. – 2004. – № 12. – С. 49–52.

7. Результаты исследования некоторых методов снижения выбросов оксидов азота на ПГУ-170 Невинномысской ГРЭС / А. Ф. Гаврилов [и др.] // Электрические станции. – 2005. – № 8. – С. 32–37.

8. Внуков, А. К. Цена подавления оксидов азота рециркуляцией газов на котлах / А. К. Внуков, Ф. А. Розанова // Энергетик. – 2008. – № 7. – С. 35–36.

9. Давидсон, А. М. Исследование и совершенствование процесса сжигания газообразного топлива / А. М. Давидсон, А. Л. Рутковский // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 4. – С. 67–71.

10. 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.

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



Представлена кафедрой
металлургических технологий

Поступила 12.11.2012