

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ ПРИ СЖИГАНИИ ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ

**Авторы:** Сулейменов К.А., Жакупов Д.М.

**Организация:** Частное учреждение «Nazarbayev University Research and Innovation System», г. Нур-Султан, Казахстан

Анализ развития энергетики Казахстана показывает, что и в обозримой перспективе, уголь по-прежнему будет играть значительную роль в электроэнергетике республики. При этом, как и прежде, ее развитие будет базироваться, большей частью, на дешевых энергетических углях. Но следует отметить, что большинство энергетических углей Казахстана открытой добычи являются низкосортными: многозольные, высоковлажные, высокосернистые, с неблагоприятной минеральной частью. Основным энергетическим углем для электроэнергетики Казахстана является высокозольный Экибастузский уголь. Следует отметить, что угольными тепловыми электростанциями (ТЭС) страны, вырабатывается более 80% всей производимой электроэнергии в Казахстане. При этом доля Экибастузского угля в угольном балансе ТЭС составляет около 90%.

Длительный опыт использования низкосортных углей в традиционной топочной технике (факельные топки с пылеугольным сжиганием), как в странах СНГ, так и в мире показывает, что проблемы эффективного использования такого топлива практически решены, но решение проблем, связанных с обеспечением необходимых экологических характеристик, касающихся снижения выбросов оксидов азота и серы из котлоагрегатов, встречают определенные трудности. Для обеспечения требуемых санитарных норм по эмиссии оксидов азота и серы в атмосферу осуществляются довольно затратные мероприятия. В мире идет постоянный поиск и разработка новых технологий сжигания твердого топлива позволяющих обеспечить не только эффективное сжигание углей, но и обеспечивающие необходимые экологические характеристики.

Одним из перспективных направлений в решении проблем эффективного и экологически чистого процесса сжигания низкосортного угля является их сжигание в топках с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Вопросы перспективности технологии ЦКС были подробно рассмотрены ранее /1/.

Одним из важнейших вредных газовых загрязнителей атмосферы при сжигании угля в котлоагрегатах ТЭС являются оксида азота –  $\text{NO}_x$ . В целом можно отметить, что в

настоящее время для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в традиционных топках с пылеугольным сжиганием используются различные способы и методы, как конструктивного характера, так режимного характера, позволяющие существенно снизить эмиссию оксидов азота из котла. Тем не менее, добиться существующими методами и способами требуемых экологических показателей по выбросам  $\text{NO}_x$ , тем более при сжигании низкосортных углей, не удастся. В связи с чем, для обеспечения весьма жестких показателей по выбросам  $\text{NO}_x$  в атмосферу устанавливаются дорогостоящие системы азотоочистки.

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные работы по исследованию образования оксидов азота в кипящем слое показали, что этот процесс отличается большой сложностью. Как было установлено /2/, основным источником оксидов азота при сжигании угля в кипящем слое является азот топлива. Установлено, что непосредственно над дутьевой решеткой происходит увеличение концентрации  $\text{NO}_x$  до максимального значения и затем концентрация  $\text{NO}_x$  постепенно снижается как в слое, так и в надслоевом пространстве. Это связано с одновременным протеканием процессов образования  $\text{NO}_x$  и восстановлением до  $\text{N}_2$ . Точный механизм окисления азота топлива до сих пор не ясен. Следует отметить, что при нагревании угля наблюдается двухстадийное выделение азотсодержащих соединений: вначале они выходят с так называемыми ранними летучими, а затем, с гораздо большей трудностью – из коксового остатка в виде поздних летучих. В работах /3,4/ сделаны попытки описать механизм образования  $\text{NO}_x$  в кипящем слое. В них принимается, что продуктами последовательной трансформации топливного азота в газовой фазе, в основном, являются  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ .

В целом механизм превращения топливного азота представляется следующим образом. По мере прогрева из угля под воздействием высокой температуры выходят летучие вещества, и остается кокс.  $\text{NO}$  образуется как из азота летучих, так и из азота кокса. С другой стороны, образовавшийся  $\text{NO}$  восстанавливается до  $\text{N}_2$  за счет реакций с азотистыми веществами летучих и окисью углерода ( $\text{CO}$ ), а также за счет гетерогенной реакции  $\text{NO}_x$  с коксом /5/.

Как было отмечено ранее, основная часть  $\text{NO}_x$  образуется в нижней части камеры и затем по высоте ее происходит снижение  $\text{NO}_x$  за счет вышеописанных реакций. Поэтому основным способом снижения  $\text{NO}_x$  является двухступенчатое сжигание.

В связи с этим, циркулирующий кипящий слой с организованным двухступенчатым сжиганием, как нельзя лучше подходит для организации твердого топлива с минимально возможной эмиссией оксидов азота. Другим немаловажным фактором технологии ЦКС, влияющим на снижение эмиссии оксидов азота, является наличие циркуляции коксового остатка, заполняющего все топочное пространство и

представляющего собой хороший восстановитель. Таким образом, технология ЦКС обладает качествами, благоприятствующими низкому уровню эмиссии  $\text{NO}_x$ .

В настоящем сообщении представлены некоторые результаты исследований по эмиссии оксидов азота при сжигании высокозольного Экибастузского угля на экспериментальной установке ЦКС, созданной в лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев Университета. Технологическая схема установки ЦКС и принцип ее работы приведены в статье «Экспериментальные установки лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев-Университет» опубликованной в данном сборнике тезисов.

Для проведения исследований по сжиганию угля в режиме ЦКС с разреза «Богатырь» были поставлены 4 партии Экибастузского угля зольностью на рабочую массу равным: 37,9%; 45,3%; 61,9% и углистая порода (соответствует характеристикам отходов углеобогащения) складированная в отвалах зольностью 68,2%. Путем смешивания угля зольностью 37,9% и 61,9% была получена дополнительная партия угля зольностью 47,2%. Смешиванием углистой породы зольностью  $A^p=68,2\%$  и золы, полученной ранее от сжигания этого угля в ЦКС, получена партия угольной породы с  $A^r=79\%$ .

Для адекватного сравнения полученных значений концентрации  $\text{NO}_x$ , используются приведенные к избытку воздуха  $\alpha=1,4$  значения концентраций  $\text{NO}_x$ .

Перевод измеренной концентрации  $\text{NO}_x$  к приведенному значению концентрации  $\text{NO}_x$  при  $\alpha=1,4$  осуществим по следующей формуле:

$$C_{\text{NO}_x, \alpha=1,4}^{\text{прив}} = C_{\text{NO}_x, \text{мг/нм}^3}^{\text{изм}} \cdot \frac{V_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0}{V_{\text{г}}^0 + (1,4 - 1) \cdot V_{\text{в}}^0} \quad (1)$$

где:  $\alpha$  – избыток воздуха;

$V_{\text{в}}^0$  – теоретическое количество воздуха,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ;

$V_{\text{г}}^0$  – теоретическое количество газа,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ .

Фракционный состав сжигаемых углей – 0-8 мм. В таблице 1 приведены основные характеристики исследованных углей, необходимые для расчета эмиссии  $\text{NO}_x$ .

Таблица 1

#### Характеристики исследованных углей

Содержан. золы	$A^r$	%	37,91	45,31	47,22	61,87	68,23	78,96
Содержан. азота	$N^r$	%	0,84	1,44	1,26	0,47	0,49	0,32
Теоретич. необх. кол-во воздуха	$V^0$ $\alpha=1,0$	$\text{нм}^3/\text{кг}$	5,15	3,99	3,59	2,55	2,09	1,44

Теоретич. объем дымовых газов	$V^{\circ}_T$ при $\alpha=1,0$	нм <sup>3</sup> /кг	5,68	2,13	1,98	3,00	2,45	1,72
Калорийность	$Q^p_H$	ккал/кг	4719	3668	3326	2356	1933	1326
Темп-ра горения	$T_{adiaб}$	°С	1660	1051	1031	1508	1471	1348
Теоретич. кол-во NO (100% переход N <sup>r</sup> в NO)	$M_{NO}$ при $\alpha=1,0$	мг/кг	18064	30908	26949	10108	10398	6759
Теоретич. концентрац. NO	$C_{NO}$ при $\alpha=1,0$	мг/нм <sup>3</sup>	3179	194921	304844	3373	4249	3926
Теоретич. концентрац. NO	$C_{NO}$ при $\alpha=1,4$	мг/нм <sup>3</sup>	2323	3231	3060	2506	3152	2930
Теоретич. концентрац. NO <sub>x</sub> при пересчете в NO <sub>2</sub>	$C_{NOx}$ при $\alpha=1,4$	мг/нм <sup>3</sup>	1705	1849	1772	1870	2349	2195

Из приведенных выше теоретических положений и результатов экспериментальных исследований следует, что уровень выбросов NO зависит от таких характеристик угля, как доля азотсодержащих соединений, вышедшей с «ранними» летучими, реакционных свойств коксового остатка, содержания летучих и азота в топливе, гранулометрического состава угля. Также, эмиссия NO<sub>x</sub> зависит и от конструктивных особенностей топочной камеры, от режимных параметров топочного процесса, таких как температура слоя, избыток воздуха, соотношение первичного и вторичного воздуха, скорости газа в топке и многих других факторов.

На рис. 1 представлена зависимость приведенных значений оксидов азота – NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> от избытка воздуха для Экибастузского угля различной зольности: A<sup>p</sup>=37,9%; A<sup>p</sup>=41,7%; A<sup>p</sup>=61,87% и A<sup>p</sup>=68,2%. Как видно из этого рисунка, с увеличением избытка воздуха до  $\alpha_{сг}=1,25-1,3$  наблюдается интенсивный рост оксидов азота для всех углей от 30 мг/нм<sup>3</sup> при  $\alpha=1,02$  до 170-300 мг/нм<sup>3</sup>  $\alpha=1,3$  для всего диапазона исследуемых углей. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  не оказывает заметного влияния на увеличении концентрации NO<sub>x</sub>, но наблюдается незначительный и монотонный рост эмиссии оксидов азота также для всех углей.

Из рисунка также видно, что увеличение зольности угля приводит к снижению эмиссии NO<sub>x</sub>, при прочих равных условиях. Так для угля зольностью 37,9% средняя концентрация NO<sub>x</sub> составила 270-300 мг/нм<sup>3</sup>, для углистой породы зольностью 68,2% - эта величина составила 170-220 мг/нм<sup>3</sup>, что связано с меньшим содержанием азота топлива в более зольном угле.

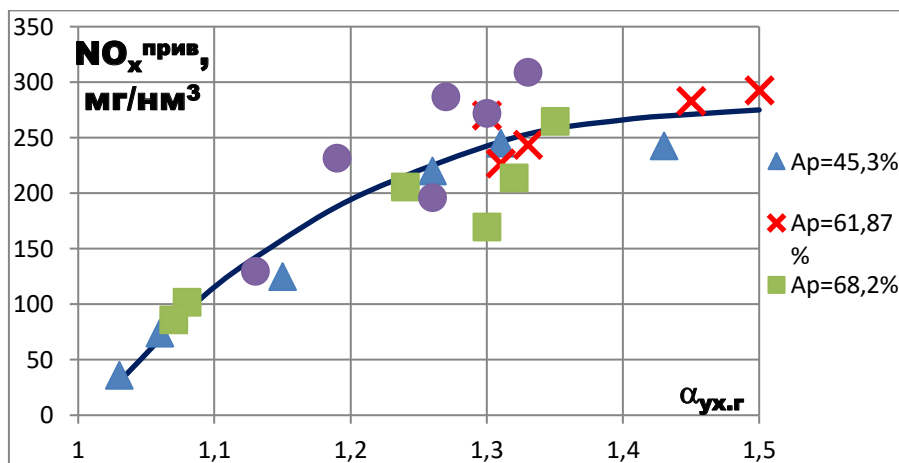


Рис. 1 Зависимость приведенной концентрации оксидов азота от избытка воздуха для Экибастузского угля различной зольности

На рис. 2 представлена зависимость эмиссии оксидов азота при сжигании Экибастузского угля различной зольности ( $A^p=37,9\%$ ;  $41,7\%$ ;  $61,87\%$ ;  $68,2\%$  и  $79\%$ ) в циркулирующем кипящем слое от температуры слоя. Как видно увеличение  $T_{сл}$  ведет к росту концентрации  $NO_x^{прив}$ . При этом, при какой-то определенной температуре слоя, диапазон изменения  $NO_x^{прив}$  для всех углей весьма значителен. Так, при рабочей температуре слоя  $875^\circ C$ , диапазон изменения концентрация  $NO_x^{прив}$  для всех углей составляет  $220 - 290$  мг/нм<sup>3</sup>, при этом для малозольного угля зольностью  $37,9\%$  концентрация  $NO_x^{прив}$  составила в среднем  $280$  мг/нм<sup>3</sup>, для угля с  $A^p=68,2\%$  среднее значение  $NO_x^{прив}$  составило ориентировочно  $250$  мг/нм<sup>3</sup>. Увеличение температуры слоя до  $T_{сл}=950^\circ C$ , привело к соответствующему увеличению приведенной эмиссии  $NO_x^{прив}$  до  $260 - 320$  мг/нм<sup>3</sup>.

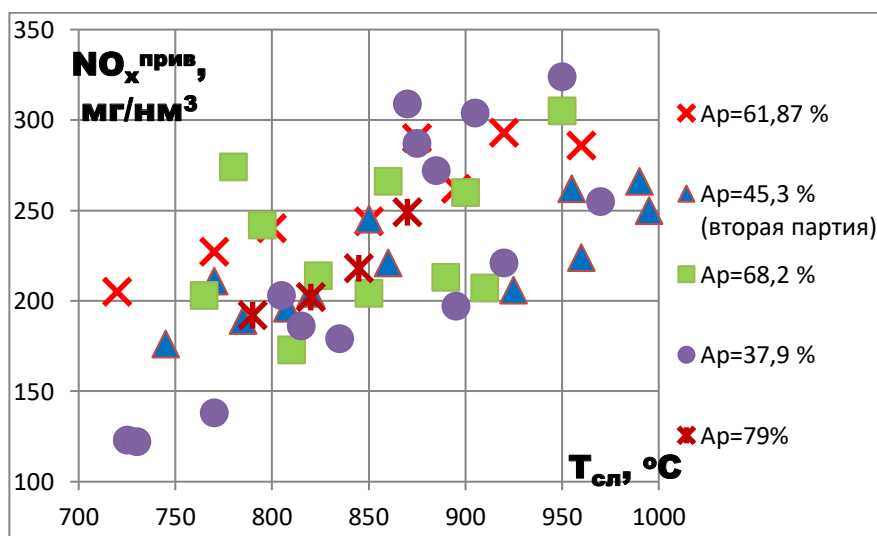


Рис. 2 Зависимость эмиссии оксидов азота от температуры слоя при сжигании угля различной зольности в ЦКС

Исследования по влиянию доли первичного воздуха -  $a_{сл}$  показало, что для всех исследованных углей увеличение значения  $a_{сл}$  ведет к росту эмиссии оксидов азота. Так, увеличение величины  $a_{сл}$  со значения равного 0,55 до 0,8, привело к росту концентрации  $NO_x^{прив}$  для угля зольностью с 200 мг/нм<sup>3</sup> до 280 мг/нм<sup>3</sup>, для угля зольностью 68,2%, соответственно, с 200 мг/нм<sup>3</sup> до 270 мг/нм<sup>3</sup>.

### Литература

1. Сулейменов К.А. Перспективы развития технологии кипящего слоя в топочной технике для сжигания углей Казахстана – Энергетики и топливные ресурсы Казахстана, 1994, № 3, с.49-54.

2. Фурасава Т., Хонда Т., Такано Дж., Кунии Д. Снижение содержания окиси азота в экспериментальной камере для сжигания угля в псевдооживленном слое. – В кн.: Новое в практике псевдооживления. М.: Мир, 1980, с.78-89.

3. Beer, Sarofim and Lee. NO formation and reduction in fluidized bed combustion of coal. Journal of the Institute of Energy. v.54, N 418, 1981, p. 38-47.

4. Gibbs B.M. A simplified model for NO formation from fuel – nitrogen in fluidized bed combustion/ - In. Institute of Energy. London Symposium Series. 1980, N 4, p. v.-4-1 – v-4-12

5. Перейра Ф.Д., Бэр Д.М. Математическая модель образования и деструкции  $NO_2$  при сжигании угля в псевдооживленном слое. М., 1980, с. 66-77.