



*It is shown that for realization of the balance "high effectiveness – low level of discharge" the complex of actions is required, as increasing of one of the indices of the balance always results in decreasing of the other one.*

И. В. КОТОВ, В. А. МАТОЧКИН, А. А. СОТНИКОВ, Е. В. БОБРОВА, РУП «БМЗ»

УДК 669

## ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Нагревательные печи служат одним из основных источников выбросов в атмосферу  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ . При этом если  $\text{CO}$  изначально является токсичным, то  $\text{NO}_x$  становится таким, соединяясь с водяными парами воздуха и образуя  $\text{HNO}_3$  (азотную кислоту).

Методами борьбы с данными видами выбросов являются недопущение образования и нейтрализация перед выпуском в атмосферу.

Наиболее контролируемые оказываются выбросы  $\text{CO}$ , образующиеся при неполном сжигании углеродсодержащего топлива ( $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ ). При этом эффективными методами снижения уровня выбросов оксида углерода могут быть как недопущение образования (подача дополнительного количества воздуха на горение), так и нейтрализация перед выпуском в атмосферу (подача свежего воздуха в выпускной тракт – при достаточно высокой температуре дымовых газов либо установка дополнительной горелки, работающей в дымовой тракте с  $\alpha > 1$ ).

При этом снижение выбросов  $\text{CO}$  прямо пропорционально повышению экономичности печи. Снижение выбросов есть устранение одной из статей в расходной части теплового баланса (химический недожог). Кроме того, предварительный подогрев воздуха перед горением, помимо улучшения экономичности работы печи, также способствует снижению образования  $\text{CO}$ .

Выбросы же  $\text{NO}_x$  вызваны образованием оксидов азота при горении топлива, точнее, окислением азота, содержащегося в воздухе, и кислорода воздуха при высокой температуре. Данное обстоятельство накладывает существенные ограничения по методам борьбы с подобными выбросами. Теоретически, не допустить образования  $\text{NO}$  можно только одним способом – использовать в качестве окислителя чистый кислород. Но данный метод сложно реализовать ввиду его дороговизны и значительных сложностей с реализацией (очень высокая температура факела, недопущение попадания масла и т.д.). Метод нейтра-

лизации дорогой и малоэффективный (применение платиновых катализаторов, пропускание дымовых газов через слой нейтрализующей жидкости и т.д.), к тому же при нейтрализации, как правило, образуются жидкие токсичные отходы. Следовательно, самыми приемлемыми способами остаются технологии, позволяющие снизить уровень образования  $\text{NO}_x$  в продуктах горения.

Принцип всех имеющихся способов один – минимизировать количество благоприятных для образования  $\text{NO}_x$  условий, а именно, температуры и наличие свободного кислорода. Как правило, эти технологии применяются комбинированно. К ним относятся введение балласта в зону горения, применение рециркуляционной или многоступенчатой схемы горения, и, несомненно, самой прогрессивной – схемы «flame Less» (она же FLOX), характеризующейся растянутым фронтом воспламенения. Так как практически все методы подавления образования  $\text{NO}_x$  ведут к ухудшению экономичности печного агрегата (ввиду незначительной по сравнению с котлоагрегатами площадью теплообмена), технология FLOX становится наиболее востребованной среди производителей горелочных устройств.

Преимущество схемы – сохранение средней температуры факела, что позволяет сохранить выгодные условия теплообмена (максимальное  $\Delta t$ ). Однако в отличие от обычной схемы горения в факеле минимизируется количество температурных пиков, которые являются основными инициаторами образования  $\text{NO}_x$ . Таким образом, данная схема наиболее предпочтительна при сохранении баланса «экономичность–экологичность». Как показывает опыт внедрения горелочных устройств «Techint» на нагревательной печи стана 150 РУП «БМЗ», применение в горелочных устройствах подобной схемы позволяет при подогреве воздуха до  $\approx 400^\circ\text{C}$  получать концентрацию  $\text{NO}_x$  не более  $250 \text{ мг/м}^3$ . Результат более чем впечатляющий, особенно в сравнении с показателями работы близких конструктивно горелочных устройств

фирмы «Bloom», установленных на нагревательной печи стана 850 и выполненных по схеме «mixing nozzle». Так, замеренные в печном пространстве печи стана 850 концентрации  $\text{NO}_x$  не опускались ниже  $620 \text{ мг/м}^3$ . При этом даже паспортные показатели подобной горелки составляют  $510 \text{ мг/м}^3$  для неподогретого воздуха. При подогреве же воздуха до  $810 \text{ К}$  производитель допускает 6-кратное (!) увеличение концентрации оксидов азота. В то же время горелочные устройства «Bloom» зарекомендовали себя как надежные и беспроблемные агрегаты, при работе же горелок фирмы «Techint» в период освоения возникал ряд проблем. Так, при изменении нагрузки на горелки наблюдался отрыв факела горения на некоторых горелках зоны. При этом соседние работали устойчиво, несмотря на запитку их из единого коллектора. Более того, отрыв возникал на различных горелках. Устранить данное явление удалось лишь программируемой настройкой реакции сервоприводов регулирующих заслонок. Таким образом, установка подобных горелок желательна параллельно с системой управления, имеющей программную поддержку.

Также достаточно перспективно выглядит схема с вдуванием водяного пара в воздух горения. Так как водяной пар обладает заметно большей теплоемкостью, чем воздух, происходит сниже-

ние температуры факела, что, однако, может быть до некоторого предела скомпенсировано повышением доли трехатомных газов в дымовых газах лучшей их теплоотдачи. Данная схема достаточно широко применяется в котлоагрегатах и демонстрирует свою высокую эффективность, однако при применении ее на печах возникает ряд сложностей, в частности, за счет меньшей, чем в котлах, площади теплообмена не всегда удается реализовать большую степень черноты атмосферы и в большинстве случаев применение данного метода связано с ухудшением экономичности. Пожалуй, самым простым методом снижения образования  $\text{NO}_x$  является уменьшение температуры подогрева воздуха. Так, снижение температуры подогрева воздуха в горелочных устройствах классической схемы с  $810$  до  $293 \text{ К}$  позволяет уменьшить концентрацию  $\text{NO}_x$  до 6 раз. Побочным фактором является снижение экономичности печи, но преодоление его возможно за счет увеличения размеров неотапливаемой зоны или установкой котлов-утилизаторов в хвостовых поверхностях нагрева.

Таким образом, для реализации баланса «высокая экономичность – низкий уровень выбросов» требуется комплекс мероприятий, так как повышение одного из показателей баланса почти всегда приводит к ухудшению другого.