

шихте вторичного сырья : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Р. Э. Трубицкий; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: [б. и.], 2014. – 22 с.

6. Слуцкий, А.Г. Энергосберегающая технология получения лигатур на основе молибдена / А.Г. Слуцкий, А.С. Калиниченко, В.А. Шейнерт // Литье и металлургия, 2014. – № 2. – С. 91–94.

УДК 621.311

**С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (Мин. пром. РБ),
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ С НИЗКОЙ ЭМИССИЕЙ NO_x

При сжигании топлива (например, природный газ в высокотемпературных технологических установках) в качестве окислителя используется кислород воздуха. Основные тепловые потери в таких установках определяются температурой и количеством уходящих газов. Учитывая, что воздух на 79 % состоит из азота, теплота, выделяющаяся при сжигании топлива, частично расходуется на нагрев азота, поступающего в составе воздуха горения. В результате получаем высокие потери с уходящими газами (перерасход топлива на подогрев азота, тепловое загрязнение атмосферы), значительное количество NO_x в уходящих газах.

Частично данные потери можно уменьшить путем рекуперации теплоты уходящих газов с целью подогрева воздуха, идущего на горение. Но и в этом случае за счет большого объема продуктов сгорания, в которых более 79 % азота, теряется до 30–40 % и более теплоты.

Применение кислорода в качестве окислителя при сжигании вместо атмосферного воздуха имеет следующие экологические преимущества [1–3]:

- повышенное содержание кислорода приводит к увеличению температуры сгорания и количества тепла, передаваемого технологическому процессу, что способствует уменьшению доли несгорев-

шого (неполностью сгоревшего) топлива и повышению КПД с одновременным сокращением выбросов NO_x ;

- поскольку атмосферный воздух на 79 % состоит из азота, переход к кислородному сжиганию приводит к соответствующему сокращению массового расхода подаваемых и отходящих газов;

- тот же фактор способствует сокращению выбросов NO_x , поскольку количество азота в камере существенно снижается;

- сокращение массового расхода дымовых газов может привести к снижению требуемой мощности газоочистных систем (например, пылеулавливающего оборудования или систем очистки дымовых газов от NO_x , если необходимость в таких системах сохраняется) и соответствующего энергопотребления;

- при производстве кислорода на самом предприятии образующийся азот может быть использован в производственном процессе, например, в системах безопасности, при создании нейтральной атмосферы там, где окислительная атмосфера может привести к нежелательным реакциям (например, пирофорным реакциям в цветной металлургии).

Производство кислорода из атмосферного воздуха требует значительных энергозатрат, которые должны учитываться при любых энергетических расчетах. Цены на кислород, закупаемый у внешних поставщиков, достаточно высоки, а собственное производство этого газа связано со значительным расходом электроэнергии. Капитальные затраты на установку воздухоразделительного оборудования также значительны и оказывают существенное влияние на экономическую эффективность сжигания в кислородной атмосфере. В некоторых условиях переход к кислородному дутью может привести к повышению общего КПД процесса (с учетом энергозатрат на производство кислорода в пересчете на первичную энергию). Однако в других случаях энергозатраты на производство кислорода могут оказаться равными объемам энергосбережения за счет кислородного дутья или даже превысить их. Эта ситуация является типичной при сравнении общего КПД печей и котлов с кислородным дутьем с аналогичными характеристиками регенеративных печей и котлов с подковообразным пламенем (торцевыми горелками).

Сравнение существующих технологий производства кислорода с энергетической точки зрения показывает явное преимущество мембранного способа (таблица 1) [4].

Таблица 1 – Сравнительный анализ энергетических затрат при осуществлении разделения атмосферного воздуха различными способами

Способ	Содержание кислорода в смеси, %	Энергетические затраты на получение 1 т эквивалентно чистого кислорода, МДж	Энергетические затраты на получение 1 м ³ кислорода при атмосферном давлении, кДж/м ³
Криогенный	50	1440	2059
Криогенные с конденсацией	90	3940	5634, 2
Адсорбционный	90	1980	2831,4
Мембранный	37,5	750	1072,5

К явным достоинствам мембранного способа разделения атмосферного воздуха следует отнести:

- низкие капитальные затраты за счет отсутствия сложных аппаратов, работающих при высоких давлениях и в условиях низких температур;
- незначительные эксплуатационные затраты;
- быстрый запуск, выход аппарата на рабочий режим и остановка процесса;
- непрерывность процесса разделения (отсутствие необходимости разогрева для восстановления эксплуатационных параметров);
- простота использования в сложных технологических процессах благодаря модульности аппаратов и простоте управления.

Высокое обогащение воздуха горения кислородом для нагревательных, термических печей и котлов приводит к необходимости реконструкции отдельных узлов агрегатов, что приводит к увеличению капитальных затрат. Так как нормы техники безопасности не допускают использование в одном агрегате технических масел и кислорода, то требуется выносить за пределы цеха воздухозаборник и смеситель, где к воздуху будет добавляться кислород. Вместе с тем следует отметить эффективность применения мембранного способа получения кислорода с невысокой концентрацией кислорода в получаемой газовой смеси (около 25–40 %) [5], который к тому же является наименее энергозатратным.

На основании приведенных соображений нами разработана принципиальная схема использования кислорода в промышленных тепловых установках с низкой эмиссией оксидов азота. Схема представлена на рисунке 1.

С целью уменьшения тепловых потерь с уходящими газами и снижения количества NO_x предлагается использовать технологию сжигания топлива с воздухом, обогащенным кислородом. Для решения поставленной задачи предлагается использовать мембранную установку (предлагается использовать керамические мембраны) для разделения воздуха.

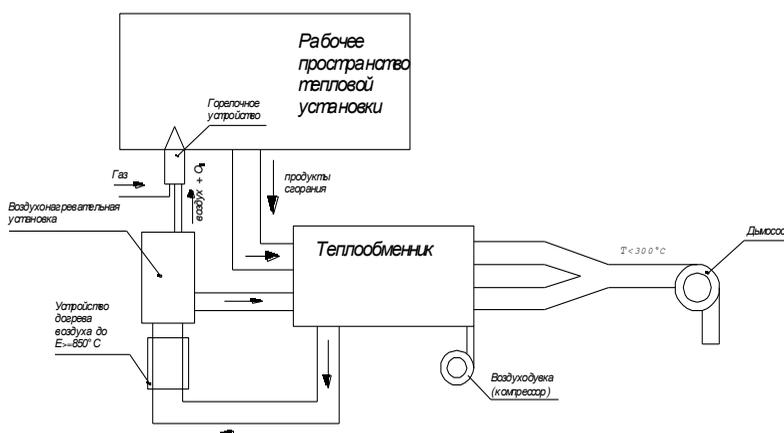


Рисунок 1 – Принципиальная схема тепловой установки (печи) с низкой эмиссией оксидов азота и дутьем, обогащенным кислородом

При разделении воздуха в мембранной установке получаем смесь с содержанием около 40 % кислорода и 60 % азота. Для функционирования данных установок необходимо, чтобы подаваемый на разделение воздух был подогрет до $T = 800\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$.

Воздух при помощи воздуходувки (компрессора) подается в рекуперативный теплообменник. В данном теплообменнике подогрев воздуха осуществляется за счет теплоты азота из воздухоразделительной установки ($T_{\text{N}_2} \approx 800\text{ }^\circ\text{C}$) и теплоты газов, уходящих из рабочего пространства технологической установки ($T \approx 800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$). В случае если в рекуператоре воздух не догревается до необходи-

мых температур (а это всегда будет иметь место в отопительных котлах), используется дополнительный нагреватель, размещенный перед мембранной установкой.

После разделения получаемый кислород (обогащенная кислородом смесь) подается в горелочное устройство. В результате возрастает температура факела, что способствует интенсификации лучистого теплообмена в рабочем пространстве высокотемпературной технологической установки, уменьшается количество продуктов сгорания и количество NO_x , сокращается расход топлива.

Список литературы

1. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей / И.Н. Карп [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 3. – С. 18–29.

2. Техничко-экономическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности. Сообщение 1. Моделирование тепловой работы котлов / С.М. Кабишов [и др.] // Энергетика. Изв. вузов и энергетич. объедин. СНГ. – 2013. – № 6. – С. 67–86.

3. Энергетический эффект от использования кислорода для обогащения воздуха горения в газопотребляющих агрегатах / В.И. Тимошпольский [и др.] // Metallургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: Новая идеология – 2013. – Вып. 5 (20) – С. 20–22.

4. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом / М.В. Мищенко, В.А. Маслов, О.Л. Дзюбенко «Современные научные исследования и инновации». – Ноябрь 2011 [Электронный ресурс] URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/5024>.

5. 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. – Спецвыпуск. – С. 218–221.