

## МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ

УДК 669.162

Томаш М.А.<sup>1</sup>, Сущенко А.В.<sup>2</sup>

### ПРИМЕНЕНИЕ ПАРОВОДЯНОЙ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Анализ технологий вдувания топливных добавок в доменные печи. Повышение эффективности использования природного газа в доменном производстве. Получение горячих восстановительных газов в условиях доменного цеха.*

**Ключевые слова:** доменная печь, косвенное восстановление железа, расход кокса, природный газ, реформер, горячие восстановительные газы, доменный газ.

*Томаш М.О., Сущенко А.В. Застосування пароводяної конверсії природного газу в доменному виробництві. Аналіз технологій вдування паливних добавок в доменні печі. Підвищення ефективний використання природного газу в виробництві. Отримання гарячих відновних газів в умовах доменного цеха.*

**Ключові слова:** доменна піч, непряме відновлення заліза, витрати кокса, природний газ, реформ ер, гарячі відновні газу, доменний газ.

*M.O. Tomash, A.V. Sushchenko. Application of water-steam conversion natural gas in a blast-furnace production. Analysis technologies of insufflation of fuel's additions in high furnaces. Most effective method of using natural gas in a blast-furnace production conditions. Receipt of hot restoration gases in the blast-furnace workshop.*

**Keywords:** blast-furnace stove, indirect renewal of iron, expense of coke, natural gas, reformer, hot restoration gases, blast-furnace gas.

**Постановка проблемы.** Одной из основных задач черной металлургии является повышение эффективности работы доменного производства и снижение энергоемкости процесса получения чугуна. При вдувании в доменные печи различных топливных добавок преследуется прежде всего цель экономии дефицитного кокса за счет использования других видов топлива — природного газа, мазута, угольной пыли и др.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Нижняя ступень теплообмена, или зона прямого восстановления железа в доменной печи, является определяющей в расходе кокса. Увеличение восстановительной способности газов в печи путем вдувания дополнительного углеводородного топлива связано с повышением концентрации CO и H<sub>2</sub>, которые в значительной степени увеличивают скорость восстановления рудного материала. С ростом содержания восстановительных газов и их давления степень косвенного восстановления железа увеличивается, что обычно приводит к сокращению расхода кокса. Между количеством вдуваемого топлива, расходом кислорода, температурой подогрева и влажностью дутья должны быть установлены соотношения, при которых условия работы печи наилучшие. Они соответствуют определенному температурному состоянию нижней ступени теплообмена печи и ее газодинамическому режиму. Теоретически и практически доказано [1], что наибольший экономический эффект достигается при применении комбинированного дутья, если на 1 м<sup>3</sup> кислорода вдувается 1,1 - 1,2 м<sup>3</sup> природного газа, 0,8 - 1,0 кг мазута или угольной пыли. Расход природного газа и кислорода в настоящее время составляет 100 - 120 м<sup>3</sup>/т. Средняя температура доменного дутья составляет около 1100 °С. Ожидаемое наибольшее снижение расхода кокса за счет оптимизации параметров дутья составит около 100 кг/т, т.е. расход кокса в среднем уменьшится не более чем до 400 кг/т [1].

Вдувание горячих восстановительных газов (ГВГ), например, полученных путем конвер-

<sup>1</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

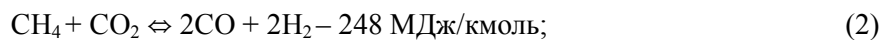
<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

тирования природного газа и другого топлива приводит к дальнейшему снижению расхода кокса и увеличению производительности печей. Важнейшим преимуществом горячих восстановительных газов является возможность использовать их в значительно большем количестве на 1 т чугуна, чем каких-либо других углеводородсодержащих компонентов комбинированного дутья. Количество образующихся в фурменном очаге продуктов горения (на единицу чугуна), в обычных условиях ограничивающих форсировку печи, при использовании горячих восстановительных газов и кислорода заметно уменьшается [2]. В этом случае при сохранении газодинамических условий в доменную печь можно вдуть большее количество кислорода в единицу времени, т. е. достигнуть при этом более высокой интенсификации процесса плавки.

**Цель статьи** – разработка и анализ эффективных способов получения и применения горячих восстановительных газов в доменном цехе.

**Изложение основного материала.** Известны различные способы получения ГВГ путем конверсии углеводородного топлива и газификации угля. При газификации угля [3] используют шахтные газификаторы кускового угля, газификаторы угольной пыли в кипящем слое, плазменные газификаторы и прифурменные газификаторы доменных печей. Известны также предложения по переоборудованию законсервированных доменных печей и воздухонагревателей в газификаторы углей.

В настоящее время наиболее распространённый путь получения ГВГ – конверсия природного газа. В зависимости от применяемого для конверсии окислителя, различают паровую, углекислотную и кислородную конверсии [4, 5]. При этом газ-восстановитель получают в результате следующих химических реакций:



Применяют конверсию природного газа каталитическую и высокотемпературную. Каталитическую конверсию метана проводят с водяным паром в трубчатых печах с внешним обогревом (паровая конверсия), а также с парокислородной смесью в аппаратах шахтного типа при небольшом повышении давления. Лучший катализатор – никелевый с различными добавками. Высокотемпературную конверсию осуществляют в отсутствие катализаторов при температурах 1350—1450 °С [2].

На основе работ Н.А. Тулина наиболее перспективным представляется использование конвертора природного газа непрерывного действия [5]. Конвертор представляет собой футерованный металлический короб, в котором расположены трубы, заполненные насадкой с никелевым катализатором. Предварительно нагретая смесь природного газа и окислителя проходит в трубах через насадку и конвертируется в смесь газов-восстановителей  $\text{CO} + \text{H}_2$ . Между трубами с каталитической насадкой расположены горелки, в которых сжигают колошниковый газ, обеспечивая теплом процесс. Конверторы непрерывного действия применяют для углекислотной конверсии природного газа в процессе твердофазной металлизации железа «Мидрекс».

Для достижения наиболее полного восстановления шихты при увеличении степени косвенного восстановления окислов железа горячие восстановительные газы (наряду с соответствующим их удельным расходом) должны иметь максимальную концентрацию  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  при минимальном содержании  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и сажи в них. Опытные плавки и выполненные расчеты показывают, что содержание окиси углерода и водорода в ГВГ должно доходить до 92 - 95 % за счет уменьшения содержания окислителей и азота. Содержание окислителей не должно быть высоким (находиться на уровне 2 - 3 %). Одним из важных технологических требований к составу вдуваемого газа является его стабильность, особенно по содержанию углекислоты, а также окиси углерода [2].

При выборе способа конверсии природного газа с целью получения ГВГ для вдувания в шахту доменной печи следует предпочесть паровую конверсию кислородной и углекислотной. При современной высокой стоимости природного газа решающим недостатком кислородной конверсии становится относительно низкий выход газов восстановителей – 3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> природного газа (реакция (3)). При паровой и углекислотной конверсии выход газов-восстановителей 4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> природного газа (реакции (1) и (2)). При углекислотной конверсии в промышленных условиях в качестве окислителя используют не чистый углекислый газ, а ко-

лошниковый газ, содержащий  $\text{CO}_2$ . В условиях доменного цеха это становится недостатком углекислотной конверсии, так как в состав восстановительного газа переходит большое количество азота из колошникового газа, что нежелательно. Кроме того, колошниковый газ содержит соединения серы, резко снижающие активность никелевого катализатора. Эти недостатки исключают возможность применения углекислотной конверсии в доменном цехе, несмотря на минимальную стоимость окислителя. Паровая конверсия лишена этих недостатков. Реакции окисления углеводородов водяным паром эндотермические.

Для проведения паровой каталитической конверсии природного газа и нагрева ГВГ до  $900\text{ }^\circ\text{C}$  необходимы затраты тепловой энергии. В качестве топлива наиболее целесообразно применить доменный газ. Это позволит повысить степень использования химической энергии колошникового газа в доменном производстве, т.к. его теплота сгорания, израсходованная на конверсию, будет возвращена в доменную печь в виде химической энергии дополнительных газов-восстановителей и физического тепла ГВГ.

Применение конвертора непрерывного действия, по типу эксплуатируемого в комплексе шахтной восстановительной печи «Мидрекс» на Старо-Оскольском металлургическом заводе, более предпочтительно, чем блока регенеративных конверторов периодического действия. Основным преимуществом конвертора (реформера) непрерывного действия является стабильность состава и температуры ГВГ. Недостатком реформера непрерывного действия является умеренная температура ГВГ –  $900 - 950\text{ }^\circ\text{C}$ .

Была проработана схема использования реформера указанного типа [6] в доменном цехе и выполнен анализ процесса получения ГВГ. Принципиальная схема и внешний вид конвертора непрерывного действия представлен на рис. 1.

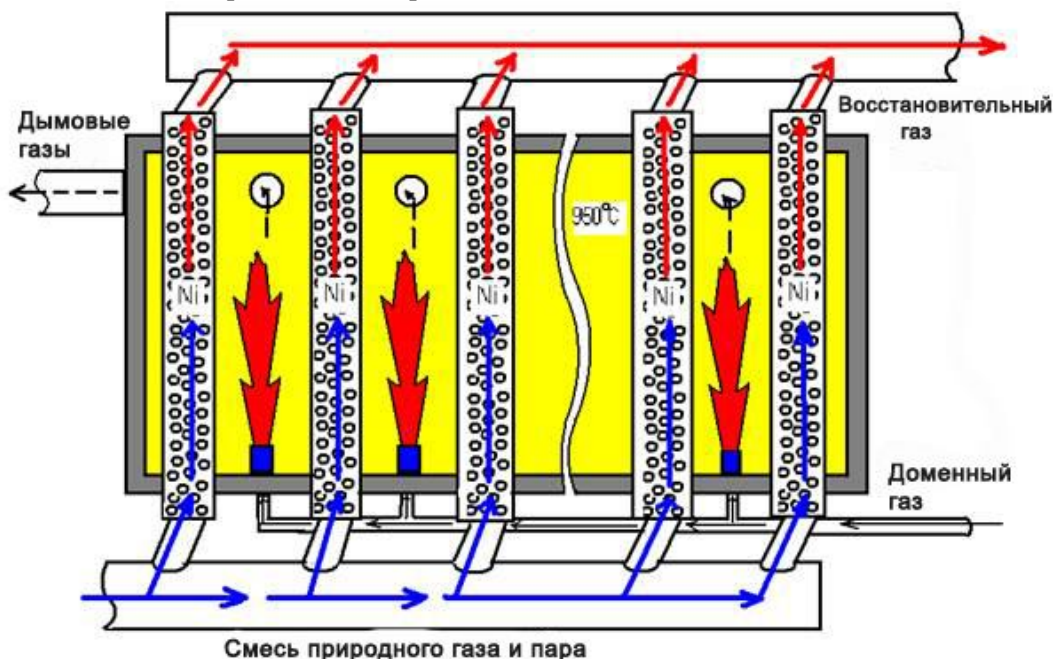


Рис. 1 – Схема реформера непрерывного действия

Корпус реформера представляет собой газоплотную сварную стальную конструкцию длиной 41, шириной 11 и высотой 9м. Поскольку рабочая температура составляет  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , стальная конструкция защищена огнеупорной футеровкой.

В реформере имеется 288 реакционных труб, размещенных вертикально в четыре ряда по 72 трубы в каждом ряду, так что в одной секции располагается 24 трубы. Трубы, обогреваемые на длине 8м, подвешены выше огнеупорного свода к стальной конструкции и могут свободно расширяться вниз через днище реформера.

Трубы реформера заполнены катализатором. Газ проходит через них снизу вверх. Исходный смешанный газ, подогретый до  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , входит в трубы снизу; конвертированный газ выходит из верхних концов труб с температурой примерно  $900\text{ }^\circ\text{C}$  и поступает в футерованные коллекторные трубопроводы.

Реформер отапливается с помощью установленных в днище в 5 рядов 120 горелок, которые работают на колошниковом газе и воздухе.

Дымовые газы отсасываются из межтрубного пространства реформера эксгаустером через восемь круглых отверстий по обеим боковым сторонам корпуса реформера ниже его свода и два футерованных дымохода, проложенных вдоль боковых сторон корпуса. Далее они проходят через два параллельно расположенных рекуператора, где отдают большую часть физического тепла косвенным теплообменом смеси природного газа и пара, после чего эксгаустер сбрасывает их в дымовую трубу.

Катализатор, загружаемый в трубы реформера, состоит из материала носителя (например, глинозема высокой чистоты) и активного компонента. В большинстве случаев в качестве катализатора для реакции конверсии применяется никель в различных концентрациях [6].

Подогреватель природного газа и пара представляет собой двухходовой конверторный рекуператор, поверхность нагрева которого состоит из нескольких параллельно расположенных U – образных труб.

На основе предложенной схемы были произведены расчеты паровой конверсии природного газа в условиях доменного цеха. По результатам расчета было определено, что при паровой конверсии 1 м<sup>3</sup> природного газа в конверторе непрерывного действия будет получено 4,584 м<sup>3</sup> конвертированного газа с температурой 900 °С следующего состава: H<sub>2</sub> – 69,2 %; CO – 21,3 %; H<sub>2</sub>O – 7,5 %; CO<sub>2</sub> – 1,8 %. Расход водяного пара составит 1,187 кг/м<sup>3</sup> природного газа, доменного газа на горелки – 6,85 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> природного газа.

Важнейшим технологическим параметром паровой конверсии природного газа является коэффициент избытка водяного пара  $\alpha_{H_2O}$ . Минимальному расходу пара на конверсию соответствует  $\alpha_{H_2O} = 1$ . Однако при таком расходе пара конверсия углеводородов будет протекать не полностью, а в составе конвертированного газа будет содержаться сажистый углерод. Его присутствие в восстановительном газе нежелательно, так как сажистый углерод может забивать газоходы. Для снижения сажеобразования избыток пара должен быть более 1,2. С увеличением  $\alpha_{H_2O}$  образование сажистого углерода прекращается, но увеличивается содержание окислителей в составе конвертированного газа (рис 2).

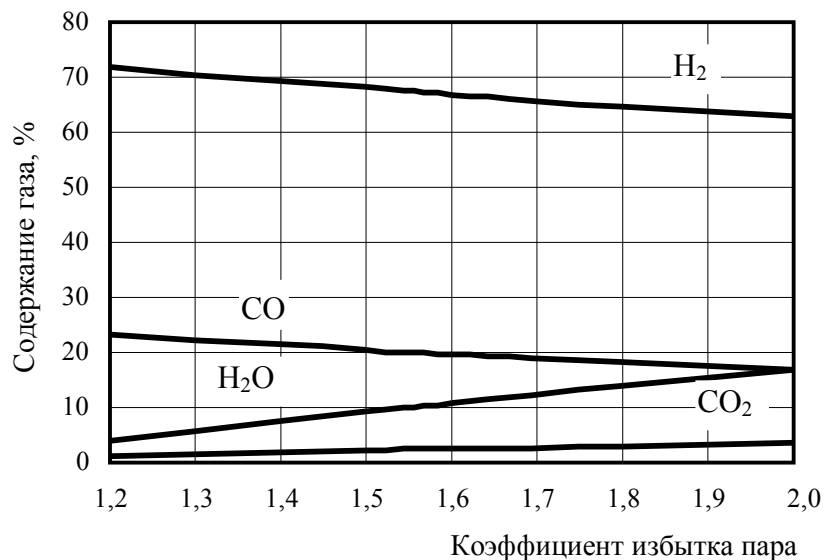


Рис. 2 – Изменение состава конвертированного газа при увеличении коэффициента избытка водяного пара, %

Так, при коэффициенте избытка пара 1,2, 1,4 и 1,8 общее содержание окислителей (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) в конвертированном газе составит соответственно: 4,8 %, 9,2 %, и 16,9 %. При повышенном расходе пара необходимы меры по удалению окислителей из состава газа. Так как основным окислителем в составе ГВГ является водяной пар, для его удаления необходимо охлаждение газа. Так, в процессах «ХИЛ – 1» и «ХИЛ – 3» для предотвращения сажеобразования выдерживают двукратный избыток пара, но затем пар из состава газа удаляют его охлаждением и

повторним нагрівом [3,4].

Для обеспечения теплотребностей процесса необходим значительный расход топлива – доменного газа. В соответствии с выполненным расчётом расход доменного газа составит  $6,85 \text{ м}^3/\text{м}^3$  природного газа. При этом расход доменного газа может существенно меняться в зависимости от его состава и теплоты сгорания (рис.3).

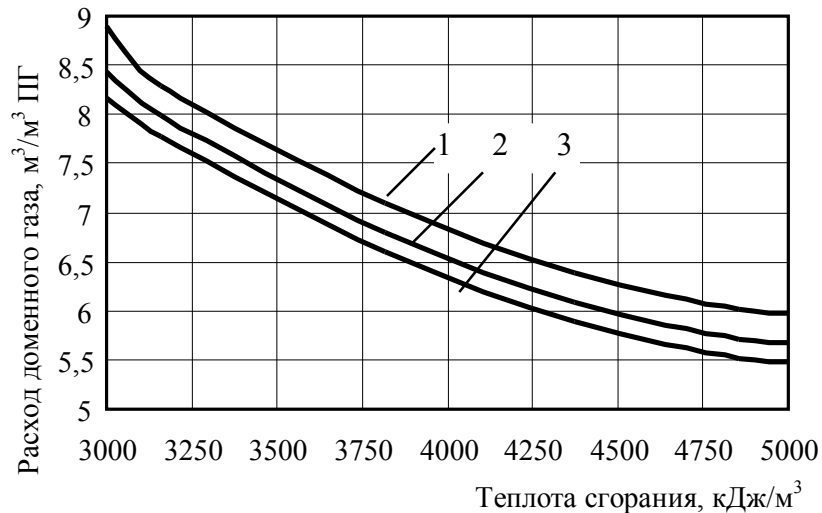


Рис. 3 – Расход колошникового газа на горелки конвертора для конверсии  $1 \text{ м}^3$  природного газа при температуре конвертированного газа: 1 -  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 -  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

#### Выводы

1. При современной высокой стоимости природного газа целесообразнее проводить паровую конверсию, т.к. объем выходящих восстановительных газов будет максимален.
2. Наиболее технологичным способом получения горячих восстановительных газов для доменной плавки является паровая конверсия природного газа в конверторах непрерывного действия.
3. При паровой конверсии  $1 \text{ м}^3$  природного газа в конверторе непрерывного действия будет получено  $4,584 \text{ м}^3$  конвертированного газа с температурой  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  следующего состава:  $\text{H}_2$  – 69,2 %;  $\text{CO}$  – 21,3 %;  $\text{H}_2\text{O}$  – 7,5 %;  $\text{CO}_2$  – 1,8 %. Расход водяного пара составит  $1,187 \text{ кг}/\text{м}^3$  природного газа, доменного газа на горелки –  $6,85 \text{ м}^3/\text{м}^3$  природного газа.

#### Список использованных источников:

1. Шульц Л.А. Элементы безотходной технологии в металлургии / Л.А. Шульц. – М.: Металлургия, 1991.-174 с.
2. Тихомиров Е.Н. Восстановительные газы и кислород в доменном производстве / Е.Н.Тихомиров. – М.: Металлургия, 1982. – 104 с.
3. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 420 с.
4. Новые процессы получения металла / Ю.С. Юсфин, А.А. Гиммельфарб, Н.Ф. Пашков. – М.: Металлургия, 1994. – 320 с.
5. Развитие бескоксовой металлургии / Н.А. Тулин, В.С. Кудрявцев, С.А. Пчёлкин [и др.] – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
6. Одностадийные процессы прямого получения жидкого металла с применением традиционных видов энергии / Иващенко В.П. [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2002. - № 1. – С. 9 – 23

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 25.03.2011