

КРАВЦОВ В.В. (ДОНГТУ), ШЕЛУДЧЕНКО В.И. (ОАО «ДОНЕЦКОБЛГАЗ»),
КУЧЕР С.В. (ДОНГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ГАЗИФИКАТОРЕ — ПЖВ

Самая высокая скорость восстановления железа может быть достигнута при высокотемпературном взаимодействии оксидов железа с углеродом, растворенном в железе, она на два порядка превышает скорости восстановления в доменной и шахтной печах. Это подтверждено и реальным процессом, происходящим во вторичной реакционной зоне кислородного конвертера, где с высокой скоростью восстанавливаются оксиды железа, поступающие из первичной зоны и смешивающиеся с углеродом расплава.

Было установлено, что скорости восстановления окислов железа отличаются на много порядков в зависимости от вида восстановителя, и условий, в которых осуществляется восстановление.

Авторами был разработан проект Газификатора — Печи Жидкофазного Восстановления (ПЖВ) с производительностью 25 т/ч чугуна и газа калорийностью не ниже 10000 кДж/м^3 около $37338 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Описание установки

В кольцевую печь по типу сталеплавильного конвертера, представленную на рис. 1, по периферии в несколько точек с помощью пневмоприводов тангенциально к боковой стенки печи подается шихта, состоящая из мелкодисперсного железорудного материала (концентрат, руда, уголь, флюсы), фракции не более 25 мм. В днище данной

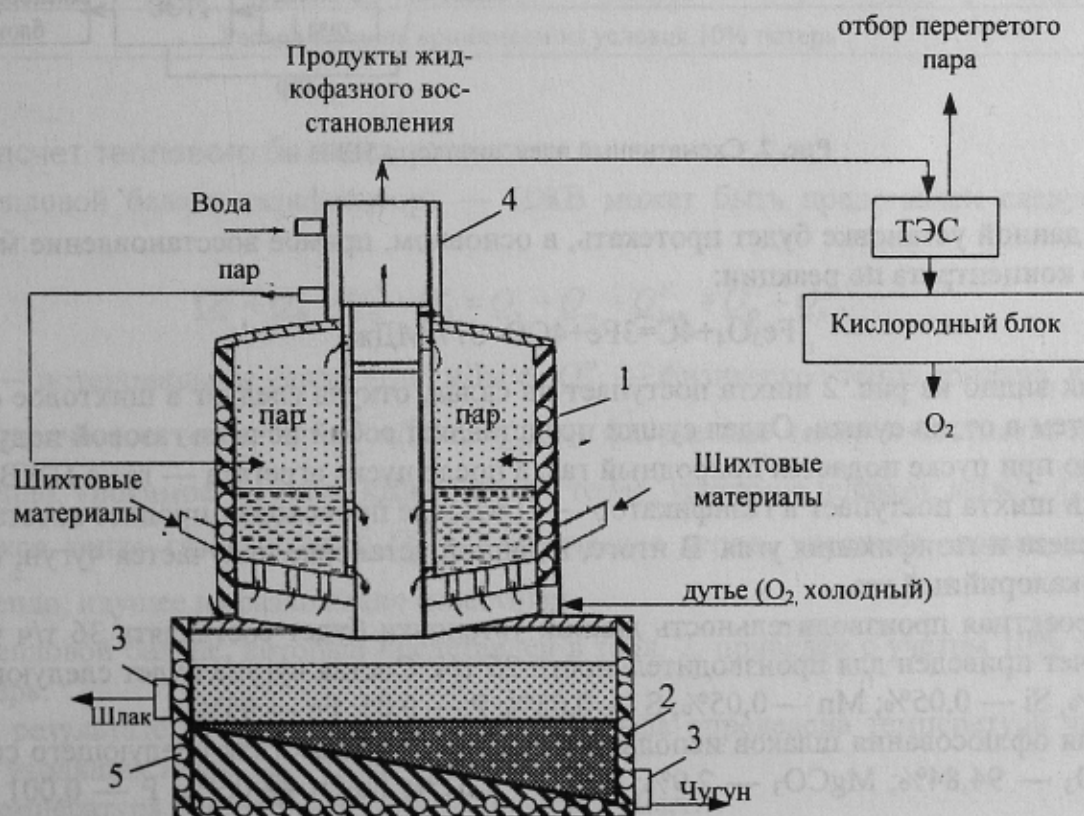


Рис. 1. Печь жидкофазного восстановления: 1 — корпус реактора; 2 — шлакоприемник; 3 — шиберный затвор; 4 — котел-утилизатор; 5 — холодильник

печи через специальную систему кислородного донного дутья (300–400 донных фурм) подается дутье, обогащенное кислородом (80% O_2), причем расход кислорода подается

с учетом содержания углерода в шлако-металлическом расплаве по мере обезуглероживания шлако-металлического расплава. Над шлакометаллическим расплавом подается пар, что позволяет уменьшить вынос пыли, а также произвести дополнительную газификацию топлива, т.е. повысить теплоту сгорания получаемого газа.

Полученный шлако-металлический расплав попадает непрерывно через сливную периклазовую трубу, в которой происходит первичная десульфурация чугуна по выпуску с увеличенной контактной поверхностью чугуна и шлака, который далее со шлаком поступает в приемную емкость, в которой происходит вторичная десульфурация чугуна и шлака в результате турбулентного смешивания и гравитационного разделения на чугун и шлак. По заполнению определенного уровня приемной емкости, производится выпуск шлака из приемной емкости, а затем чугуна. Четыре фурмы — горелки, установленные на выходе из периклазовой сливной трубы, установленной по центру кольцевой печи, служат для разогрева всего агрегата в пусковой период, после длительной остановки или при дефиците тепла. Высококалорийный газ с температурой 300–350°C транспортируется к газоочистке и далее на ТЭС завода или комбината после чего электроэнергия с ТЭС подается на кислородный блок для выработки кислорода и к потребителю. Схематичный план комплекса ПЖВ представлен на рис. 2.

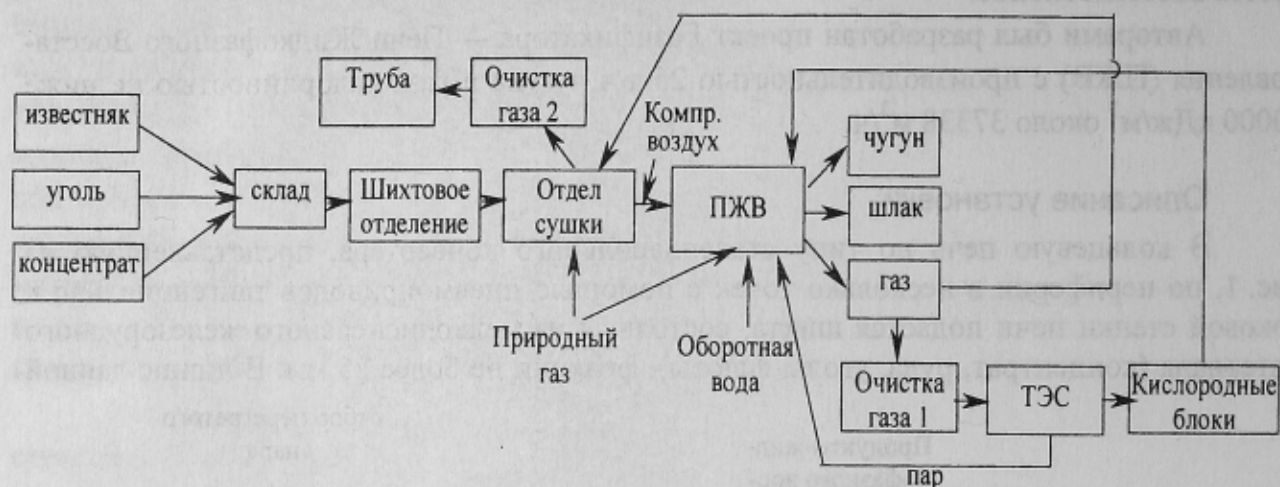
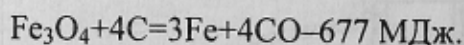


Рис. 2. Схематичный план комплекса ПЖВ

В данной установке будет протекать, в основном, прямое восстановление магнетитового концентрата по реакции:



Как видно из рис. 2 шихта поступает на склад, откуда следует в шихтовое отделение, затем в отдел сушишки. Отдел сушишки представляет собой печь на газовой подушке, в которую при пуске подается природный газ, а после пуска агрегата — газ с ПЖВ. После сушишки шихта поступает в газификатор — ПЖВ, где происходит процесс восстановления железа и газификация угля. В итоге, в данной установке получается чугун, шлак и высококалорийный газ.

Проектная производительность данной установки будет составлять 36 т/ч чугуна, а расчет приведен для производительности 25 т/ч. Состав чугуна будет следующим: С — 4,8%, Si — 0,05%; Mn — 0,05%; S — 0,05%; P — 0,05; Fe — 95%.

Для офлюсования шлаков используем Еленовский известняк следующего состава: CaCO_3 — 94,84%; MgCO_3 — 2,9%; SiO_2 — 1,31%; Fe_2O_3 — 0,9%; P — 0,001 S — 0,043.

Для расчета тепла, которое необходимо для восстановления 1 кг железа необходимо оценить какое тепло получается в результате реакции неполного горения углерода, при условии, что степень газификации составляет 100%.

Количество тепла, которое получается в результате экзотермической реакции газификации угля определяется по формуле:

$$Q_n^p \frac{\Delta H_{CO}}{\Delta H_{CO_2}},$$

где Q_n^p — теплота сгорания угля, кДж/кг; $\Delta H_{CO}, \Delta H_{CO_2}$ — тепловые эффекты от неполного и полного сгорания углерода.

Отношение этих тепловых эффектов составит 0,281. Тогда, теплота, которая вносится при газификации 1 кг топлива, составит 7194,16 кДж/кг. В связи с этим расход топлива на покрытие эндотермического эффекта реакции восстановления оксидов железа увеличится. Однако, т.к. в данном случае получается высококалорийный генераторный газ, который в дальнейшем может быть использован на ТЭС завода для производства электроэнергии, и как следствие кислорода, а также пара, то себестоимость чугуна при таких затратах топлива будет ниже, чем в доменном процессе (табл.1).

В табл. 1 приведены результаты расчета процесса жидкофазного восстановления железа с использованием угля марки АШ, магнетитового концентрата с содержанием Fe_3O_4 — 60%, и Еленовского известняка.

Табл.1 — Материальный баланс процесса жидкофазного восстановления железа

Приход	т/ч	кг/с	Расход	т/ч	кг/с
Магнетитовый концентрат	39,2	10,8	Чугун	25	6,95
Уголь	26,85	7,46*	Продукты восстановления	42,12	11,7
Дутье ($j=80\%$)	16,32	4,53	Шлак	21,93	6,10
Известняк	10,46	2,91	Потери с уносом	4,05	1,13
Всего	93,10	25,8	Всего	93,10	25,88
* Расход топлива принимаем из условия 10% потерь					

Расчет теплового баланса установки

Тепловой баланс газификатора — ПЖВ может быть представлен следующей формулой:

$$Q_n^p + Q_{\phi}^m + Q_{\phi}^o + Q_{\phi}^u = Q_{\chi} + Q_{ш} + Q_{хив} + Q_{\phi}^g + Q_u^p,$$

где Q_n^p — потенциальное тепло угля, кДж/с; Q_{ϕ}^m — физическое тепло топлива, кДж/с; Q_{ϕ}^o — физическое тепло дутья, кДж/с; Q_{ϕ}^u — физическое тепло известняка, кДж/с; Q_{χ} — тепло, уносимое чугуном, кДж/с; $Q_{ш}$ — тепло, уносимое шлаком, кДж/с; $Q_{хив}$ — химическое тепло газов, кДж/с; Q_{ϕ}^g — физическое тепло, уносимое газами, кДж/с; Q_u^p — тепло, идущее на разложение известняка.

Тепловой баланс, который представлен в табл. 2, приведен с учетом 10% тепловых потерь.

В результате итерационных вычислений была определена температура чугуна, шлака и уходящих газов.

Температура продуктов восстановления составит:

$$t_{пв} = \frac{26413,8}{13,24 \cdot 1,33} = 1500 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где 13,24 — расход продуктов восстановления, м³/с; 1,33 — суммарная теплоемкость продуктов восстановления, кДж/(м³°С).

Табл.2 — Тепловой баланс печи жидкофазного восстановления железа

Приход	кДж/с	Расход	кДж/с
Потенциальное тепло топлива	190990	Чугун	9382,5
Физическое тепло топлива	1790,4	Шлак	16844
Физическое тепло дутья	136,44	Химическое тепло продуктов восстановления	120004
Физическое тепло концентрата	4050,0	Потери на разложение известняка	5175,9
Физическое тепло известняка	611,1	Физическое тепло продуктов восстановления	26413,8
		Тепловые потери	19757,8
Всего	197578	Всего	197578

Данный расчет приведен для основности шлака 1,1. На рис. 3 приведена зависимость температуры продуктов восстановления от основности шлака.

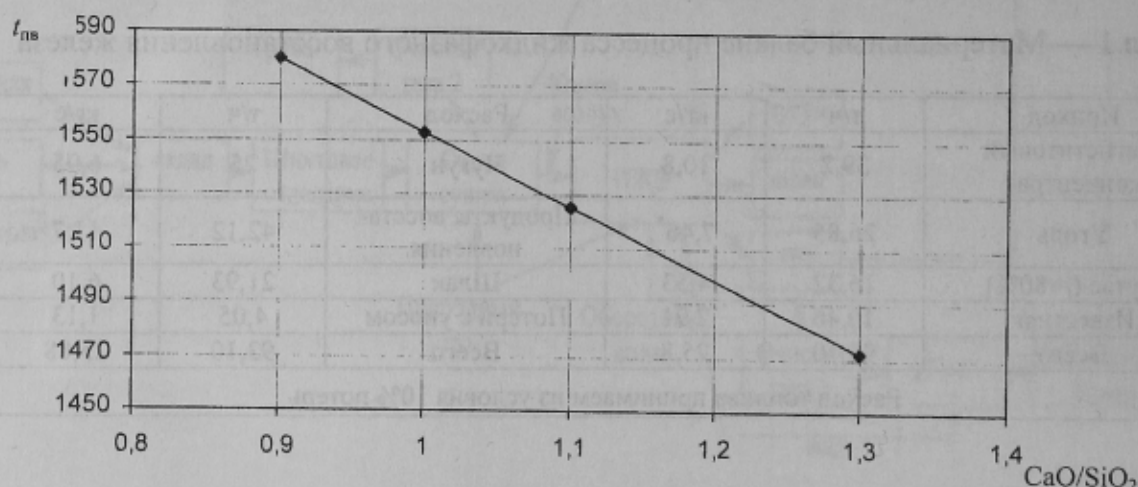


Рис. 3. Зависимость температуры продуктов восстановления от основности шлака

Как известно, теплота сгорания газа, получаемого в результате частичной газификации и восстановления оксидов железа, зависит от степени обогащения дутья кислородом. На рис. 4 и 5 приведены зависимость состава газа, теплоты сгорания и температуры продуктов восстановления от степени обогащения дутья кислородом.

Как видно из рис. 4 с увеличением степени обогащения дутья кислородом возрастает доля горючих составляющих газа, т.е. увеличивается теплота сгорания газа. Также с увеличением обогащения дутья кислородом возрастает температура продуктов восстановления. Для данного примера степень обогащения дутья кислородом была выбрана из расчета производительности кислородной станции 14000 м³/ч, а также для обеспечения температуры процесса 1500°С.

Были также проведены расчеты себестоимости строительства модуля печи жидкофазного восстановления железа, а также срока окупаемости предлагаемой установки для двух случаев: 1 — в случае строительства на новой площадке со строительством новой инфраструктуры, 2 — в случае строительства на действующем предприятии без привязки к конкретному объекту. Общая расчетная стоимость строительства модуля для 1-го случая составляет 125590 тыс.грн., для 2-го случая — 19805 тыс.грн.

Для оценки эффективности строительства модуля составлена калькуляция себестоимости 1 т чугуна, полученного путем жидкофазного восстановления железа, а также определена себестоимость кислорода.

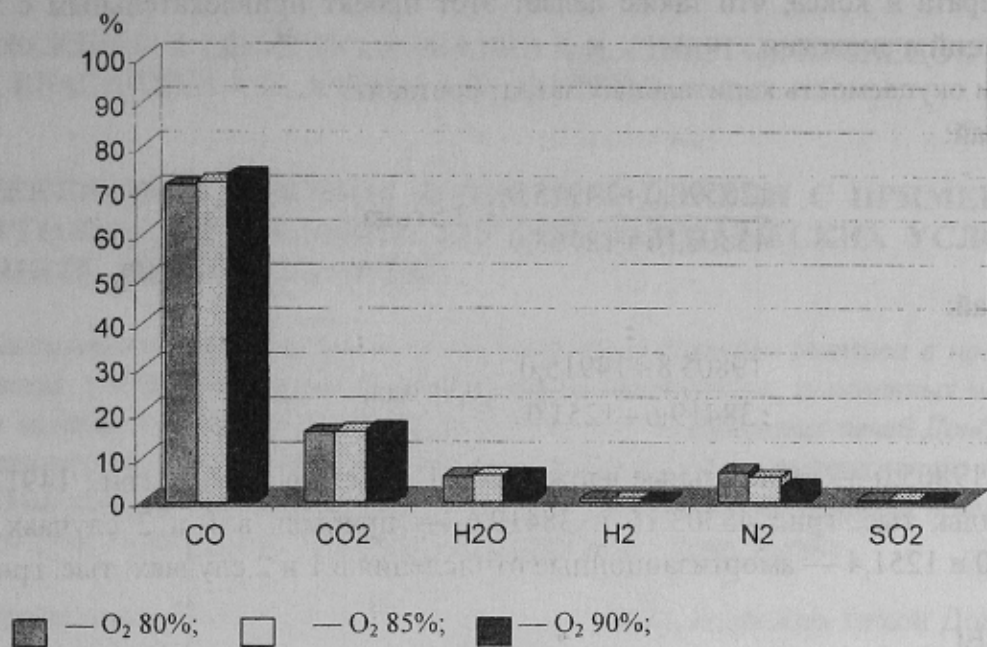


Рис. 4. Гистограмма состава газа от степени обогащения дутья кислородом

Полная себестоимость производства 1 т чугуна составляет: для первого случая — 421,11 грн., для второго случая — 398,63 грн. Производственная стоимость 1000 м³ кислорода составляет 115,59 грн. с учетом использования продуктов восстановления на ТЭС завода. Годовой выпуск чугуна — 217,2 тыс. тонн.

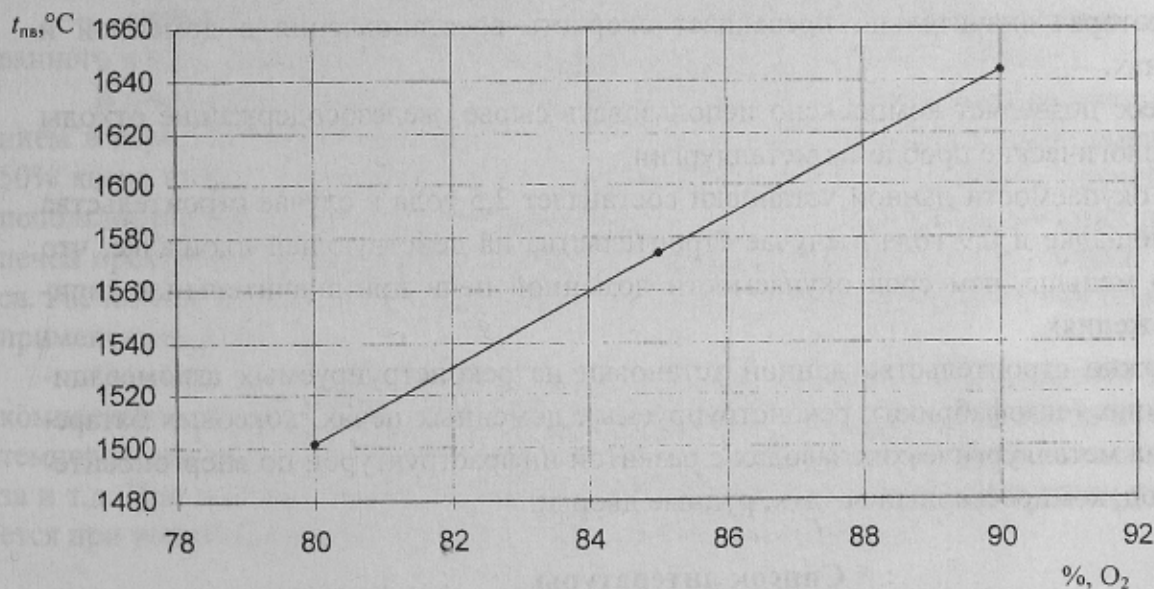


Рис. 5. Зависимость температуры продуктов восстановления от степени обогащения дутья кислородом

Проведена сравнительная характеристика основных технико-экономических показателей производства чугуна в ПЖВ и в доменной печи. Себестоимость производства чугуна в доменной печи составляет 547,74 грн./т. Таким образом видно, что даже при том, что расход топлива в ПЖВ на 20% выше, за счет отсутствия косвенного восстановления, себестоимость чугуна ниже. Это объясняется тем, что производство кислорода, пара и электроэнергии в этом случае идет с использованием физического и химического тепла отходящих газов, с возможностью дальнейшая продажи получаемых энергоресурсов потребителю. Кроме того в схеме ПЖВ отсутствуют затраты на произ-

водство агломерата и кокса, что также делает этот проект привлекательным с точки зрения инвестиций и экологии.

При этом окупаемость капитальных затрат составит:

— 1 случай:

$$\frac{125590,0 + 14915,0}{43303,16 + 12763,0} = 2,5 \text{ года};$$

— 2 случай:

$$\frac{19805,8 + 14915,0}{38419,6 + 1251,0} = 0,9 \text{ года},$$

где 125590,0 и 19805,0 — капитальные вложения в 1 и 2 случаях, тыс. грн.; 14912,0 — оборотные фонды, тыс. грн.; 43303,16 и 38419,6 — прибыль в 1 и 2 случаях, тыс. грн./год; 12763,0 и 1251,4 — амортизационные отчисления в 1 и 2 случаях, тыс. грн./год

ВЫВОДЫ

Таким образом, достоинством газификатора — ПЖВ является возможность использования низкокалорийных тощих углей, вместо дорогостоящего кокса в процессе производства чугуна, а также применение мелкодисперсного железорудного сырья без предварительной подготовки его в виде окатышей и агломерата.

Процесс восстановления оксидов железа с углеродом, растворенном в железе при их высокотемпературном взаимодействии, отмечается высокой скоростью восстановления, которая значительно превышает скорость восстановления в доменной и шахтной печах.

Процесс позволяет комплексно использовать сырье, железосодержащие отходы и решать экологические проблемы металлургии.

Срок окупаемости данной установки составляет 2,5 года в случае строительства на новой площадке и 0,9 года в случае строительства на действующей площадке, что значительно меньше, чем срок окупаемости доменной печи при значительных капитальных вложениях.

Возможно строительство данной установки на реконструируемых агломерационных машинах (аглофабрики), реконструируемых доменных печах, коксовых батареях, а также на металлургических заводах с развитой инфраструктурой по энергоносителям (кислород, компрессорный воздух, рудные дворы).

Список литературы

1. Роменец В.А. Процесс жидкофазного восстановления железа; разработка и реализация // Сталь, 1990. — № 8. — С. 20–27.
2. Капустин Е.А., Логозинская В.Н. Тепломассообмен в газоструйно-жидкостных реакторах // Труды международной конференции «МИФ-3» — Минск, 1996. — Т. II.
3. Кравцов В.В., Рыженков А.Н. Пути энергосбережения в черной металлургии // Металл и литье Украины, 1996. — № 5. — С. 8–12.

© Кравцов В.В., Шелудченко В.И., Кучер С.В., 2001