

*Мишин И.В.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЯЧИХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

Приведені результати теоретичних досліджень оптимальних режимів вдування гарячих відновлювальних газів в горн доменної печі як окремо, так і з витратою пиловугільного палива 100 та 150 кг/т чавуну.

***Ключові слова:** гарячі відновлювальні газы, коефіцієнт заміни, пиловугільне паливо.*

Приведены результаты теоретических исследований оптимальных режимов вдувания горячих восстановительных газов в горн доменной печи как отдельно, так и с расходом пылеугольного топлива 100 и 150 кг/т чугуна.

***Ключевые слова:** горячие восстановительные газы, коэффициент замены, пылеугольное топливо.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Современная технология производства чугуна характеризуется высокой степенью эффективности. В первую очередь это коэффициент полезного действия печи – 85-90 %, низкий уровень расхода топлива – 450-500 кг условного топлива на 1 т выплавляемого чугуна, высокая единичная мощность металлургического агрегата. Для обеспечения данных технологических показателей применяется железорудное сырье с содержанием железа 60-65 %, и, самое главное, кокс, произведенный из дефицитных коксующихся углей. Для получения кокса используются высококачественные низкозольные коксующиеся угли, запасы которых в настоящее время значительно истощены в Украине, в отличие от запасов энергетических углей с высоким содержанием золы и серы. Значительная часть коксующихся углей импортируется, в основном из России и Польши. На долю Украины приходится 3,5 % мировых запасов угля [1], которых при существующем уровне добычи хватит на 350-400 лет. Таким образом, необходимо задействовать весь потенциал рядового каменного угля не только в энергетике, но и в металлургии, в частности в доменном производстве.

Анализ последних исследований и публикаций. Начиная с 50-х годов XX века стали применять заменители кокса – природный газ, ма-

зут, пылеугольное топливо (ПУТ). Но в настоящее время стоимость 1 тыс. м³ природного газа и 1 т мазута сравнима с себестоимостью 1 тонны чугуна. Поэтому наибольшее распространение получила технология с вдуванием в горн доменной печи пылеугольного топлива. К углям, используемым для приготовления ПУТ, предъявляют серьезные требования – низкую зольность (до 10-12 %), низкое содержание серы, а содержание летучих колеблется в зависимости от расхода ПУТ и технологии – 5-40 %. Существующий уровень технологии позволяет вдувать до 250-260 ПУТ кг/т чугуна, что ограничивает возможности замены кокса менее дорогим энергетическим углем. Главной причиной этому является неполная газификация угля в фурменной зоне печи, низкие показатели качества кокса – реакционная способность (CRI) и горячая прочность (CRS). Одним из вариантов решения данной проблемы является получение горячего восстановительного газа (ГВГ) (таблица 1) из рядовых углей вне доменной печи с температурой 800-1300 °С и содержанием восстановителей CO+H₂ 85-95% .

Таблица 1 – Опытные и промышленные плавки с применением горячих восстановительных газов [4,5,6]

Опытные плавки	Год	Дополнительная информация
Франция, г. Кнютанж	1957 г.	Вдувание в верхнюю часть заплечиков, t _{ГВГ} 1200 °С, состав ГВГ, %: 26,5 H ₂ +CO, 5 CO ₂ , 0,5 O ₂ , 66,5 N ₂
Франция, г. Помпей	1961 г.	Паро-кислородный крекинг мазута, t _{ГВГ} 1300 °С, состав, %: 46,1 H ₂ , 46,9 CO, 4,3 CO ₂ , 2,7 N ₂ , 8 % углерода мазута не газифицировалось, неравномерное распределение по сечению печи, коэффициент замены (КЗ) кокса 0,7 кг/кг мазута
Украина, МК «Азовсталь», г. Мариуполь	1964- 1966 гг.	1 этап: паровая конверсия природного газа, вдувание в горн печи, отдельный подвод ГВГ и дутья, низкая степень использования H ₂ , CO ₂ +H ₂ в ГВГ 3 %. 2 этап: вдувание ГВГ совместно с холодным природным газом, равномерное распределение газа по сечению печи, заметное снижение r _d
Россия, Ново- тульский метал- лургический за- вод, г. Тула	1965- 1968 гг.	Вдувание ГВГ в горн, конверсия природного газа водяным паром и CO ₂ колошникового газа, отдельная подача дутья и ГВГ через разные фурменные приборы; работа на ГВГ без дутья, снижение r _d до 0,11
Япония, МК «Кейхин»	1958- 1960 гг.	Парокислородная конверсия мазута, способ FTG, вдувание ГВГ в шахту печи, снижение r _d до 0,15, КЗ 0,8 кг/кг ГВГ
Япония, г. Хирохата	1970- 1971 гг.	Вдувание в шахту, КЗ 0,25-0,3 кг/м ³ ГВГ, состав ГВГ, %: 50 H ₂ , 40,4 CO, 3 CO ₂ , 6 H ₂ O

Продолжение таблицы 1

Опытные плавки	Год	Дополнительная информация
Бельгия, г. Угрэ	1970 г.	Вдувание ГВГ в шахту, $t_{\text{ГВГ}} - 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, состав: $77 \text{ H}_2 + \text{CO}$, 2 CH_4 , $21 \% \text{ H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, $\text{KЗ } 0,147 \text{ кг/м}^3 \text{ ГВГ}$
Бельгия, г. Серена	1972 г.	Вдувание ГВГ в шахту, состав ГВГ, %: 71 H_2 , 17 CO , $3 - \text{CH}_4$, $3 \text{ CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{KЗ} - 0,22-0,26 \text{ кг/м}^3 \text{ ГВГ}$.
Россия, Новотульский металлургический завод, г. Тула	1987-1989гг.	Вдувание ГВГ в горн, рециркуляционный режим, полная замена дутья ГВГ, расход $665-998 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, $t_{\text{ГВГ}} - 1082-1120 \text{ }^\circ\text{C}$, достигнут расход кокса 335 кг/т чугуна.
Швеция, г. Лулео	2008 г.	Проект ULCOS (кислородная доменная плавка с рециркуляцией колошникового газа)

Из таблицы видно, что основной способ получения ГВГ это конверсия природного газа или мазута. Недостаток существующих способов конверсии заключается в использовании дорогостоящих катализаторов, сложности технологии, содержании значительного количества сажи и окислителей.

В статье [7] предложен один из вариантов получения ГВГ путем газификации угля в процессе жидкофазного восстановления Ромелт. Особенностью данной технологии является получение наряду с жидким чугуном ГВГ из наиболее дешевых энергетических углей, объем ГВГ на тонну чугуна составляет $3500-4500 \text{ м}^3$. Расчетным путем показана возможность получения восстановительного газа с составом $\text{CO} + \text{H}_2$ до $85-90 \%$, окислителей $4-6 \%$ и температурой $1000-1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значительное содержание восстановителей и сравнительно низкое содержание окислителей в сочетании с высокой температурой определяют высокую перспективность использования ГВГ в доменной плавке.

Целью данной работы является определение оптимального расхода ГВГ в технологических условиях Украины как при вдувании в горн совместно с пылеугольным топливом (ПУТ) так и отдельно, оценка коэффициента замены кокса ГВГ.

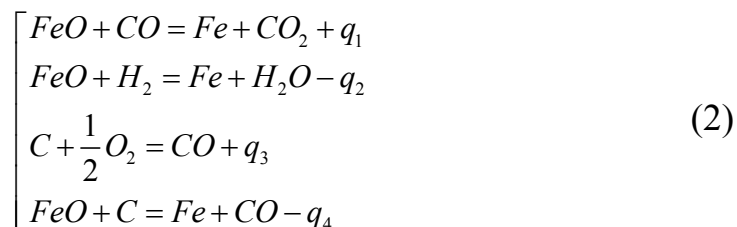
Основная часть. Специфика работы доменных цехов Украины заключается в применении железорудного сырья с низким содержанием железа и низкокачественного кокса с высоким содержанием золы, серы, низкой степенью горячей прочности (CRI) и высокой реакционной способностью (CRS). Данные условия приводят к высокому выходу шлака – $300-350 \text{ кг/т}$ чугуна и более, снижению производительности и газопроницаемости зоны когезии. Следовательно, при расчете оптимального расхода ГВГ необходимо учесть определяющие параметры газодинамики – скорость газа в распаре, м/с, выход шлака и горновых газов на тонну кокса [8].

Для расчета основных показателей доменной плавки был выбран комплексный метод Рамма. Начальный режим доменной плавки принят без вдувания дополнительного топлива, железорудное сырье – окатыши с содержанием железа 61 % и основностью 0,8, расход кокса – 545 кг/т чугуна, выход шлака 330 кг/т чугуна. Параметры дутья: температура – 1000 °С, влажность – 12 г/м³ дутья, кислород – 0,21 м³ O₂/м³ дутья.

Так как опытно-промышленные плавки дают слишком большой разброс значений КЗ кокса, был рассчитан коэффициент замены по теплосодержанию ГВГ с учетом затрат тепла на разложение H₂O+CO₂ (1) и ряду реакций (2).

$$I_{ГВГ} = T_{ГВГ} \cdot c_0 \cdot (CO + H_2 + N_2) + (T_{ГВГ} \cdot c_{CO_2} - 12645) \cdot CO_2 + (T_{ГВГ} \cdot c_{H_2O} - 10800) \cdot H_2O \quad (1)$$

где T_{ГВГ} – температура ГВГ, °С; c₀, c_{CO₂}, c_{H₂O} – теплоемкость газов при температуре T_{ГВГ}; 12645 и 10800 – затрата тепла на разложение 1 м³ CO₂ и H₂O; CO, H₂, N₂, CO₂, H₂O – содержание компонентов в %.



где q₁ = 243 кДж/кг Fe, q₂ = - 496 кДж/кг Fe, q₃ = 9800 кДж/кг С, q₄ = - 2762 кДж/кг Fe – тепловые эффекты реакций.

Потери тепла в нижней зоне (уровень фурм, заплечики, распар) принимаем 7 % от прихода тепла в фурменной зоне. Коэффициенты замены для ГВГ с составом CO 80 %, H₂ 10 %, CO₂ 2 %, H₂O 3 %, N₂ 5%, температурой от 700 до 1200 °С и степенью использования восстановительной способности монооксида углерода и водорода η_{H₂+CO} 0,4, 0,42 и 0,45 представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, горячие восстановительные газы обладают значительным потенциалом замены кокса. Большое значение в коэффициенте замены играет степень использования восстановительного газа, поэтому необходимо правильно организовать распределение ших-

ты по всей высоте печи для лучшей восстановимости железорудных материалов.

Таблица 2 – Коэффициенты замены кокса при различных степенях использования η_{H_2+CO} и температурах ГВГ

Температура, °С	Коэффициент замены		
	$\eta_{H_2+CO}=0,4$	$\eta_{H_2+CO}=0,42$	$\eta_{H_2+CO}=0,45$
700	0,272	0,275	0,293
800	0,286	0,289	0,308
900	0,292	0,305	0,323
1000	0,308	0,320	0,338
1100	0,322	0,335	0,351
1200	0,338	0,351	0,367

Для расчета параметров доменной плавки примем температуру ГВГ 900 °С, степень использования η_{H_2+CO} 0,42 и КЗ 0,305. Результаты расчета расхода кокса, выхода шлака и горновых газов на тонну кокса, скорости газа в распаре приведены на рисунках 1,2 и 3. Пунктирными линиями выделены предельные значения величин, при превышении которых будет наблюдаться нарушение хода доменной печи.

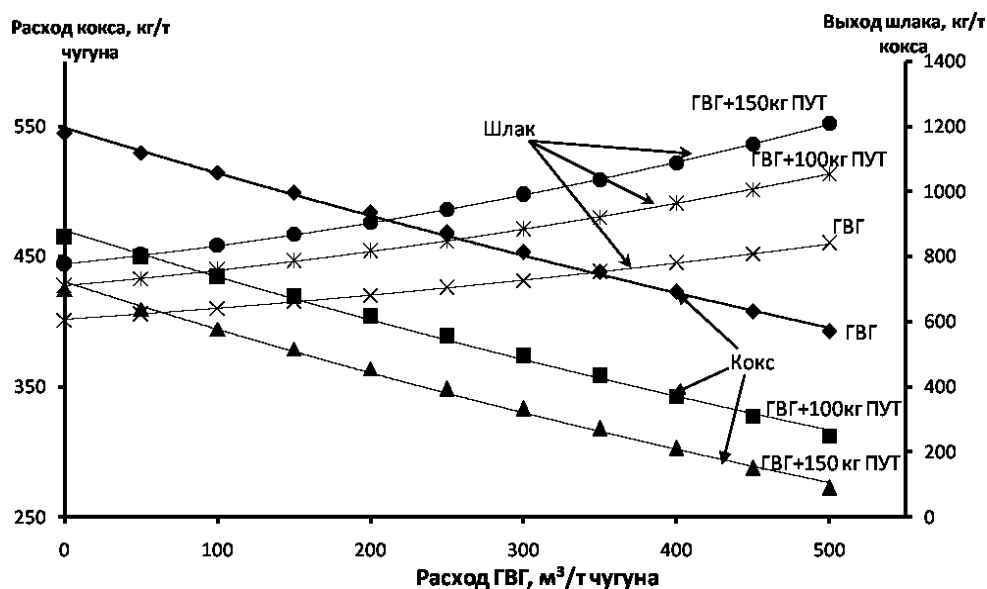


Рисунок 1 – Зависимость расхода кокса и выхода шлака на тонну кокса от расхода ГВГ и ПУТ

Из рисунка 1 видно, что расход кокса снижается прямопропорционально с увеличением расхода ГВГ и ПУТ. Предельный выход шлака (1000 кг/т кокса) наблюдается в режимах 100 кг ПУТ+450 м³ ГВГ и

150 кг ПУТ+250 м³ ГВГ. При применении только ГВГ без других видов дополнительного топлива стабильность работы печи достигается во все режимах.

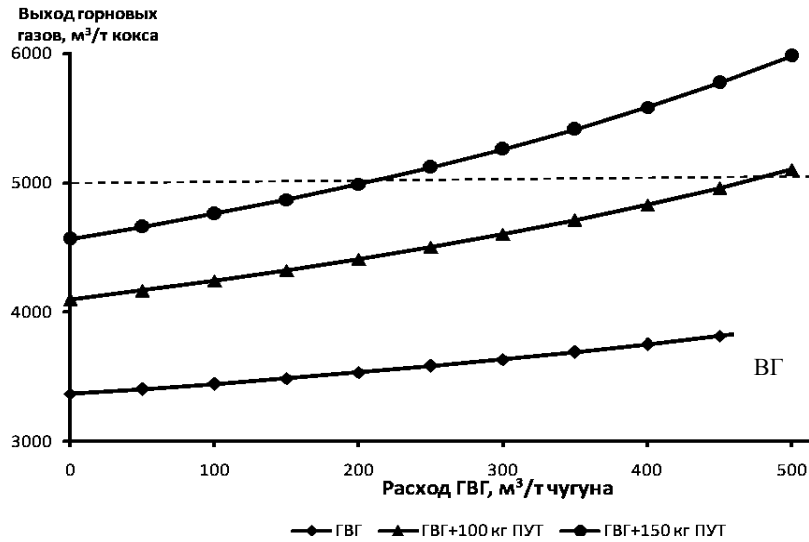


Рисунок 2 – Зависимость выхода горновых газов от расхода ГВГ и ПУТ

При учете выхода горнового газа, как определяющего параметра хода процесса, предельными режимами являются 150 кг ПУТ+200 м³ ГВГ и 100 кг ПУТ+470 м³ ГВГ. Применение только ГВГ не лимитирует процесс.

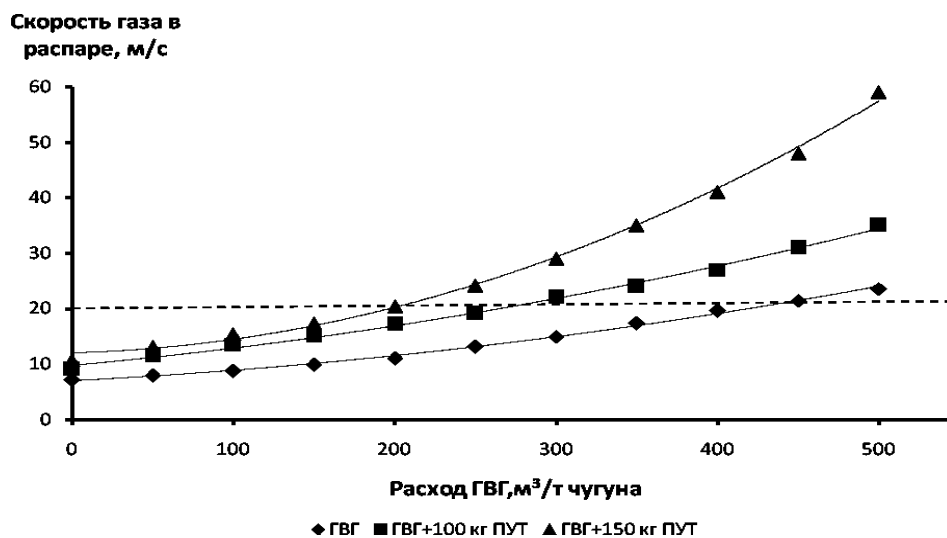


Рисунок 3 – Зависимость скорости газа в распаре от расхода ГВГ и ПУТ

Наибольшее влияние на ход процесса оказывает скорость газа в распаре, так как при превышении скорости 20 м/с уже наблюдаются подвисяния шихты и канальный ход. Предельные режимы – 150 кг ПУТ+200 м³ ГВГ, 100 кг ПУТ+280 м³ ГВГ, 450 м³ ГВГ.

Выводы. Произведен анализ вдувания ГВГ в горн доменной печи, на примере расчетов показана зависимость коэффициента замены кокса ГВГ от температуры и степени использования СО+Н₂. Определены оптимальные (предельные) режимы: для технологии с вдуванием только ГВГ – 450 м³ ГВГ/т чугуна, с расходом 100 кг ПУТ/т чугуна – 280 м³ ГВГ/т чугуна, с расходом 150 кг ПУТ/т чугуна – 200 м³ ГВГ/т чугуна.

Библиографический список

1. Сперкач И.Е. Аналитический обзор ресурсов угля в России и за рубежом/ И.Е. Сперкач // *Сталь*. – №12. – 2010. – С. 2-4.

2. Ярошевский С.Л. Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах / С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева, А.В. Кузин, И.В. Мишин // *Новости науки Приднепровья*, 2010. – С. 25-31.

3. Babich A. Choice of Technological Regimes of a Blast Furnace Operation with Injection of Hot Reducing Gases / A. Babich, H.W. Gudenau, K. Mavrommatis etc. // *Revista de metalurgia*, 2002. – №4. – pp. 288-305.

4. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М.: *Металлургия*, 1980. – 304 с.

5. Пухов А.П. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов / А.П. Пухов, Г.М. Степин, М.А. Цейтлин и др. // *Сталь*, 1991. – №8. – С. 7-13.

6. Блоштейн Филипп Использование технических газов в доменном производстве / Блоштейн Филипп, Дево Мишель, Грант Майкл // *Металлург*, 2011. – №8. – С. 39-43.

7. Мишин И.В. Бескоксая технология выплавки чугуна для условий Украины / И.В. Мишин. – *Матеріали V науково-практичної конференції “Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених”*: м. Донецьк, 25-27 травня 2010 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2010. – С. 181-186.

8. Ярошевский С.Л. Ресурсы и эффективность полной и комплексной компенсации при использовании пылеугольного топлива в доменной плавке // С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева, В.Е. Попов, А.И. Дрейко, А.В. Емченко, Н.В. Голухин // *Черная металлургия: Бюл. НТИ.* – 2010. – №7. — С. 40-49.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.