

РЕАЛИЗАЦИЯ ГИБКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА

Минин Сергей Игоревич, ст. преподаватель
Гилева Лариса Юрьевна, канд. техн. наук, доц.
Половец Михаил Вячеславович, аспирант
E-mail: s.i.minin@urfu.ru

Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина
г. Екатеринбург, РФ

Аннотация. Нестабильность качества кокса, железорудных материалов сопровождается изменением производительности печи и расхода суммарного углерода топлива. Гибкие технологические режимы, основанные на выборе соотношения расходов технологического топлива – кокса, пылеугольного топлива и природного газа позволяют снизить потери. Выбор управляющих воздействий, направленных на достижение заданной производительности печи и высокой экономичности процесса при существующих сырьевых условиях, базируется на условии сохранения перепадов давления и теплового состояния печи. Предложены подходы к количественной оценке технологического режима и показателей работы печи при контролируемых изменениях качества шихтовых материалов и параметров комбинированного дутья на основе цифровой модели доменной печи. Выбор того или иного технологического решения зависит от поставленной задачи управления, конструктивных особенностей и условий работы доменной печи с учетом стоимости топлива.

Ключевые слова. Доменная печь, расход топлива, качество кокса, газодинамический режим, производительность печи.

Зависимости между фактическими данными о показателях работы доменных печей показывают, что увеличение производительности печи при снижении расхода кокса лимитируется газодинамическими условиями, которые во многом определяются качеством шихтовых материалов и зависят от расходов технологического топлива (рис. 1).

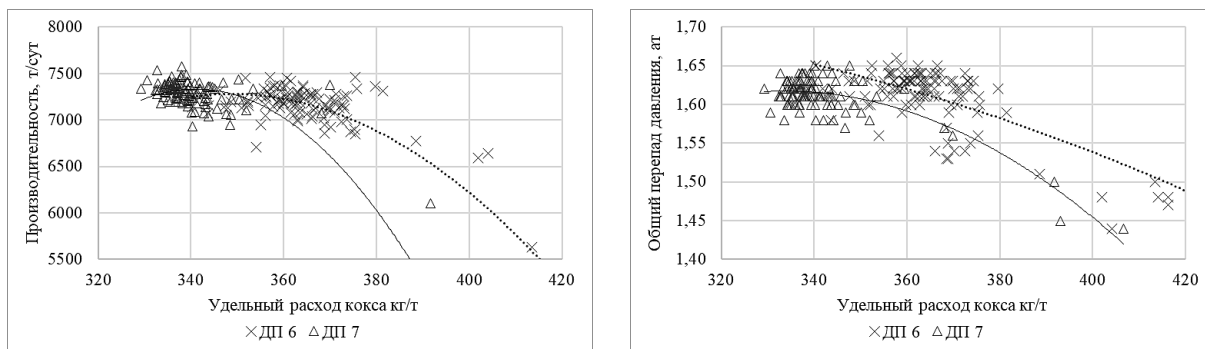


Рис. 1. Взаимосвязь между удельным расходом кокса и показателями работы печей № 6 и 7 АО «ЕВРАЗ НТМК»

В основе реализации гибких технологических режимов лежит выбор соотношения расходов технологического топлива: кокса, пылеугольного топлива и природного газа, которое обуславливает как тепловое состояние печи, определяющее суммарный расход углерода, так и газодинамику доменной плавки, определяющую производительность печи.

Принимая во внимание сложное влияние расходов технологического топлива на показатели плавки, для выбора вида и величины компенсационных воздействий целесообразно использовать цифровую модель доменного процесса, учитывающую взаимосвязь

качества шихтовых материалов, теплового состояния печи, интенсивности плавки и газодинамического режима верхней и нижней зон доменной печи.

Основные зависимости цифровой модели, описывающие газодинамику процесса

Зависимость выхода газа от параметров дутья и интенсивности плавки описывается уравнением

$$V_{\Gamma} = 2V_{O_2} + (H_2)_{ПГ}V_{ПГ}P_{мин} + (H_2)_{ПУТ}V_{ПУТ}P_{мин} + 1,867(C_d^{Fe} + C_d^{эл})P_{мин}, \quad (1)$$

где V_{O_2} – поступление кислорода с дутьем, м³/мин; $V_{ПГ}$, $(H_2)_{ПГ}$ – расход природного газа и содержание в нем водорода, м³/т и м³/м³; $V_{ПУТ}$, $(H_2)_{ПУТ}$ – расход пылеугольного топлива и содержание в нем водорода, кг/т и м³/кг; C_d^{Fe} , $C_d^{эл}$ – расход углерода на прямое восстановление оксидов железа и элементов, кг/т; $P_{мин}$ – минутная производительность печи, т/мин.

Выход (скорость) газа и газодинамические характеристики слоя определяют перепад давления (уравнение Эргона):

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d_{экв}} \frac{(1 - \varepsilon) T P_0 \rho_0 w_0^2}{\varepsilon^3 \frac{T}{T_0} \frac{P}{P_0} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{w_0}{w}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент, учитывающий поверхностные свойства кусков; h – высота слоя, м; $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр кусков слоя, м; ε – порозность слоя (относительный объем межкускового пространства в слое), м³/м³; T , P – средняя температура и среднее давление газа в слое, К, Па; ρ_0 , w_0 – плотность и скорость газа при нормальных условиях, кг/м³, м/с. Перепад давления, при котором изменения газопроницаемости слоя не приведут к критическим условиям движения газа в нижней зоне печи, определяет критический расход кислорода и соответственно производительность печи, которая рассчитывается по следующему уравнению:

$$P_{мин} = \frac{V_{O_2}}{1,867(C_{сумм} - 10[C] - C_d^{Fe} - C_d^{эл})}, \quad (3)$$

где $C_{сумм}$ – суммарный удельный расход углерода, кг/т; $[C]$ – содержание углерода в чугуне, %.

Перепады давления определяются двумя факторами: удельным газодинамическим сопротивлением слоя и кинетической энергией газового потока.

Важным фактором, определяющим газопроницаемость слоя, является расход кокса в нижней зоне печи. На рис. 2 приведена зависимость газопроницаемости слоя от удельного расхода кокса при разном качестве шихтовых материалов.

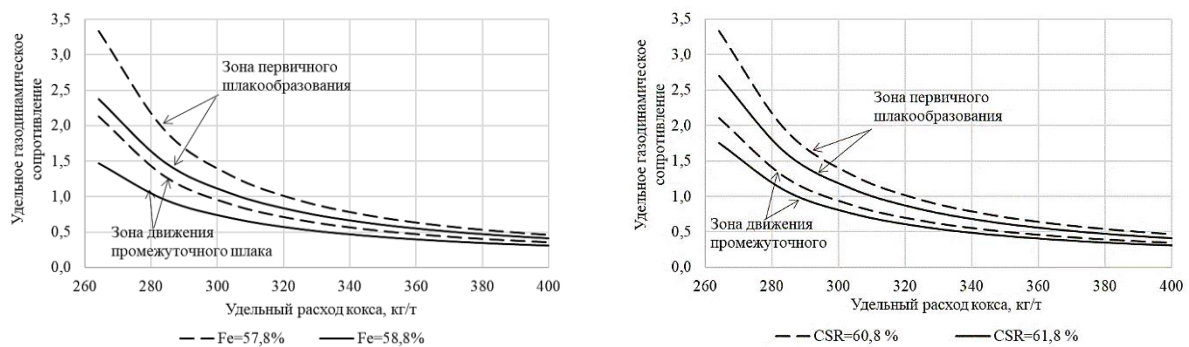


Рис. 2. Зависимость газопроницаемости слоя от удельного расхода кокса при разном качестве шихтовых материалов

Анализ зависимости удельного газодинамического сопротивления от расхода кокса показал, что чем ниже удельный расход кокса, особенно ниже 320 кг/т чугуна, и ниже качество шихтовых материалов, тем в большей степени его снижение приводит к ухудшению газодинамических условий. Значение 320 кг/т может рассматриваться как нижняя граница удельного расхода кокса при заданной производительности печи.

Расчетами показано, что при рассматриваемых колебаниях показателей качества кокса для условий печей АО «ЕВРАЗ НТМК», изменения эквивалентного диаметра кусков кокса в зоне первичного шлакообразования составляет от 5 до 10 % отн., что приводит к колебаниям порозности слоя в зоне первичного шлакообразования до 6 % отн.

При изменении качества шихтовых материалов стабилизация газодинамического режима может быть реализована путем изменения удельного расхода кокса, оказывающего влияние на газопроницаемость слоя и (или) изменением подачи кислорода, определяющим изменение количества газа. Избыток или недостаток тепла, образующийся при изменении расхода кокса и (или) кислорода, может быть компенсирован изменением расходов углеводородных добавок – пылеугольного топлива, природного газа.

Результаты моделирования влияния расхода кокса на показатели газодинамического режима при условии сохранения производительности печи и ее теплового состояния при разном отношении расходов пылеугольного топлива и природного газа (ПУТ/ПГ) приведены на рис. 3.

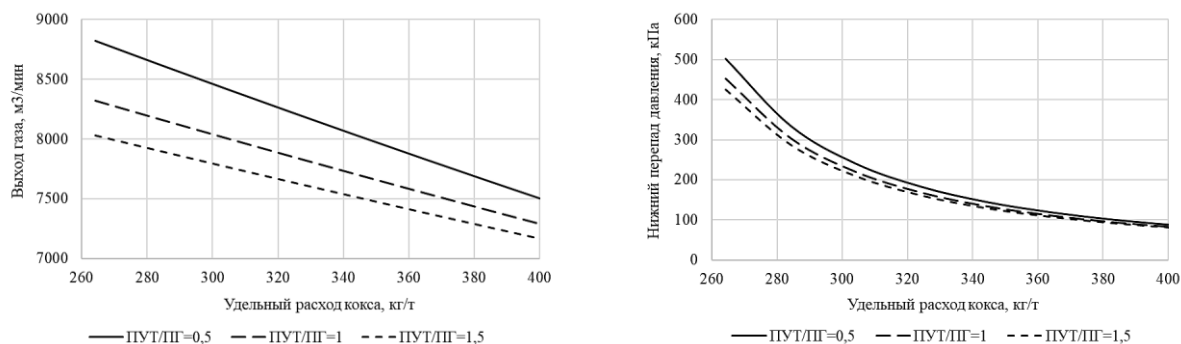


Рис. 3. Зависимость показателей газодинамического режима от расходов технологического топлива

Чем выше ПУТ/ПГ, тем в меньшей степени проявляется влияние рудной нагрузки на выход газа. Наиболее значимое влияние расхода кокса на перепад давления проявляется при меньших значениях ПУТ/ПГ, особенно при удельном расходе кокса менее 320 кг/т чугуна. Это объясняется нелинейностью влияния расхода кокса на удельное газодинамическое сопротивление.

Результаты расчетов для рассмотренных условий работы доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» показали, что при снижении эквивалентного диаметра кокса на 1 мм или снижении горячей прочности кокса (*CSR*) на 1,4 % для сохранения перепада давления в нижней зоне необходимо снизить расход дутья на 6,8 %, что сопровождается таким же снижением производительности печи. Или при условии сохранения производительности печи для снижения газопроницаемости слоя необходимо увеличить расход кокса на 14 кг/т при условии сохранения ПУТ/ПГ и от 4 до 15 кг/т при изменении этого отношения.

Конкретные значения требуемого изменения расхода кокса и производительности печи зависят от поставленной цели управления, конструктивных особенностей и условий работы доменной печи и могут быть определены с помощью разработанной системы поддержки принятия решений на основе цифровой модели доменной печи.

Библиографический список

1. Влияние повышенного давления в доменной печи на эффективность ее работы / С. В. Филатов [и др.] // Сталь. – 2015. – № 4. – С. 11–14.
2. Учет влияния гранулометрического состава кокса на его металлургическую ценность / С. И. Минин [и др.] // Кокс и химия. – 2022. – № 9. – С. 10–14.
3. Неполадки и аварии в работе доменных печей / Б. Н. Жеребин, А. Е. Пареньков. – Новокузнецк, 2001. – 275 с.
4. Danloy, G. Influence application of the CRM blast modern at Sidmar / Danloy G., Midnon J., Munnix R. [et al.] // Proceedings 3rd International Conference Science and Technology Ironmaking, Düsseldorf. – 2003. – P. 83–88.
5. Гилева, Л. Ю. Разработка структурированного математического обеспечения для решения комплекса технологических задач организации и управления доменным процессом / Л. Ю. Гилева [и др.] // В сборнике: Современные сложные системы управления : материалы XII международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 205–209.