

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДСИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ПЛАВКИ*

Костанда Г.О., группа ИУС-06м
Руководитель доц. Привалов М.В.

Введение. В начале XXI века Украина оказалась единственной страной в мире использующей для вдувания в доменные печи импортный природный газ (далее ПГ), цены на который непрерывно растут и, видимо, скоро достигнут мирового уровня. Поэтому решение вопроса о массовом промышленном внедрении пылеугольного топлива (ПУТ) с целью замены им части или всего ПГ и значительного снижения расхода кокса, не терпит отсрочки, становится в ряд важнейших и определяющих государственных задач. Тем более, что сейчас для решения данной задачи, в отличие от 60-70-х годов прошлого столетия, имеются все необходимые предпосылки.

Кокс является наиболее дорогостоящим компонентом доменной шихты, определяющим эффективность технологии, а доля стоимости кокса и ПГ в себестоимости чугуна составляет 40-50 % [1]. Цены на кокс на мировом рынке уже достигают 300-400 \$ США за 1 т, и будут повышаться и дальше, поэтому задача замены его при производстве чугуна более дешевыми материалами является актуальной, а ее решение – экономически эффективным [2]. Наибольшее распространение в мире получило направление замены кокса пылеугольным топливом (ПУТ), вдуваемым через фурмы доменной печи. Это позволяет сэкономить до 50 % и более кокса и снизить, таким образом, его расход до 250-400 кг/т чугуна. Во всем мире наметилась тенденция по внедрению пылеугольной технологии, которая позволила бы существенно снизить себестоимость чугуна.

*консультанты по технологической части проф. Ярошевский С.Л., асс. Афанасьева З.К.

Для разработки технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ, для каждого конкретного доменного цеха, необходимо выполнить серию расчётов, прогнозирующих технико-экономические показатели и гарантирующих максимальную достоверность прогноза всех результатов плавки при заданных ее условиях.

Технологические показатели доменной плавки можно рассчитать различными методами.

Из-за сложности и взаимосвязанности протекающих в доменной печи процессов, система описывающих их дифференциальных уравнений не имеет точного аналитического решения и конечные результаты не могут быть получены в виде формул, связывающих их со входными параметрами. Система может быть решена только численными итерационными методами. Для моделей ставящих себе целью полное описание доменного процесса, вычислительная процедура очень сложна и представляет значительные трудности даже при использовании современных компьютеров. Создание кинетико-математических моделей доменного процесса одна из важнейших задач современной металлургической науки. В течение последних 50 лет в этом направлении устремлены усилия ряда исследователей Германии, Японии, США, Англии, Нидерландов, стран СНГ и др.

Постановка задачи. Преобладающая часть созданных моделей относится к числу статических, т.е. описывает только установившиеся режимы плавки; разработке динамических моделей посвящены работы немецких и американских ученых. При этом возникали трудности и препятствия на пути создания полных и строгих моделей не преодоленные ни в одном из предложенных вариантов.

Таким образом, необходимо создать модель, учитывающую большую часть интересующих технолога параметров и позволяющую получать данные для точного определения режима плавки.

Решение задачи. За основу предлагаемой математической модели был принят метод расчета Рамма А.Н.[3], который впервые объединил в одних

уравнениях материальные и тепловые показатели и ввел понятие тепловых эквивалентов материалов.

Сущность метода расчета Рамма А.Н. заключается в том, что к системе уравнений материального баланса, связывающих между собой расходы различных компонентов шихты в соответствии с заданным составом чугуна и шлака и удельным выходом шлака. В модель было добавлено уравнение теплового баланса, определяющее соотношение между расходом кокса и остальными компонентами. Удельный расход кокса вводится как неизвестная величина во все уравнения материального и теплового балансов.

Модель позволяет адекватно рассчитывать показатели, определяющие эффективность доменной плавки среди которых, можно выделить: расход кокса; производительность; выход шлака; выход газа-восстановителя; степень использования газа; степень прямого восстановления; теоретическая температура (регламентирующий показатель); коэффициент замены кокса вдуваемой добавкой (пылеугольное топливо, мазут, конвертированный, коксовый, горячий восстановительный газ).

Исходными данными модели Рамма А.Н. являются:

1. Степени окисления железа и марганца в шихте (Ω_{Fe} , ν , Ω_{Mn}).
2. Расход флюса на ошлакование пустой породы рудной части шихты (Φ_p , кг/кг чугуна), золы кокса (Φ_k , кг/кг кокса) и золы вдуваемого твёрдого топлива (Φ_s , кг/кг топлива).
3. Выход шлака из рудной части шихты и относящегося к ней флюса ($U_{p.ф.}$, кг/кг чугуна), из золы кокса и расходуемого на её ошлакование флюса ($U_{k.ф.}$, кг/кг кокса) и золы вдуваемого топлива ($U_{s.ф.}$, кг/кг топлива).
4. Содержание C, H, N и S в сухом коксе.
5. Полный состав выплавляемого чугуна.
6. Энтальпия чугуна (Q_e) и шлака (Q_u).
7. Параметры дутья (ω , ϕ , t_d).

8. Расход вдуваемых в горн на 1 кг чугуна восстановительного газа (S_1 , м³) и жидкого или твёрдого топлива (S_2 , кг), состав вдуваемых реагентов и их температуры.

9. Внешние потери тепла, выраженные в долях общего прихода тепла в горне (z).

10. Температура «сухого» колошника t_r^o в базовом режиме ($\omega=0,21$; $\phi=0$; $t_d=1000$ 0C; $S_1= S_2=0$), 0C.

11. Степени прямого восстановления железа в базовом режиме r_a^o .

12. Отношение степеней использования водорода и оксида углерода ($\xi=\eta_{H_2}/ \eta_{CO}$).

Представленной моделью предлагается дополнить модель Рама А.Н. вычислением характеристик шихты, на основе количества и химического состава шихтовых материалов, для получения требуемых для последующих расчётов данных, таких как: степени окисления железа и марганца в шихте; расхода флюса на ошлакование пустой породы рудной части шихты, золы кокса и золы вдуваемого твёрдого топлива; выхода шлака из рудной части шихты и относящегося к ней флюса, из золы кокса и расходуемого на её ошлакование флюса и золы вдуваемого топлива.

Расчет производительности печи изменён – учитывается показатель газопроницаемости шихты, существенно изменяющиеся при вдувании больших количеств ПУТ. Был рассчитан показатель газопроницаемости на основе объема руды (V_P , м³/т чугуна), объем кокса (V_K , м³/т чугуна) и отношения потерь напора газов в слое рудной части шихты и кокса (L , принято равной 15):

$$d = \left(L \frac{V_P}{V_K} + 1 \right) * \left(\frac{V_P}{V_K} + 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

После дополнений формула производительности печи (P) выглядит следующим образом:

$$P = P_o \frac{V_r^{o'}}{V_r'} \left(\frac{d^o \theta^o \gamma^o}{d \theta \gamma} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

где P_o - базовая производительность; $V_{г'}^o$ - выход сухого колошникового газа (включая пар) в базовом периоде; θ - абсолютная температура газа; γ - плотность газа; $\theta^o \gamma^o$ - значения в базовом периоде.

Также необходимо отметить, что основной зависимостью при расчёте полной комплексной компенсации является сохранение суммарного коэффициента замены кокса-ПУТ (ΣK_3) на уровне $\Sigma K_3 \geq 1$.

$$\Sigma K_3 = (\Delta Q_{кПУТ} + \Delta Q_{кКМ}) / \Delta Q_{ПУТ} \quad (3)$$

где $\Delta Q_{кПУТ}$ и $\Delta Q_{кКМ}$ – экономия за счёт прироста расхода ПУТ и сопутствующей реализации комплексных мероприятий; $\Delta Q_{ПУТ}$ – соответственно прирост расхода ПУТ.

Наряду с этими дополнениями, в модели существует возможность использования компенсирующих мероприятий для поддержания необходимых технологических параметров, что, также, позволяет производить проектные расчёты для доменных цехов заводов Украины.

Была выполнена программная реализация разработанной математической модели и проведен машинный эксперимент для проверки адекватности предлагаемой модели реальному технологическому процессу. Проверка выполнялась для основных показателей доменного процесса. Результаты эксперимента сведены в табл. 1.

Как видно из результатов моделирования, приведенных в таблице 1, модель позволяет получить данные для проекта режима работы доменной печи. Более того, в предлагаемой математической модели предусмотрена возможность расчёта для случая вдувания в горн жидкого и твёрдого топлива, а также использования в шихте металлизированных окатышей. Улучшены некоторые расчётные схемы и формулы.

Таблица 1 – Результаты проверки адекватности модели для некоторых основных показателей доменного процесса*

показатели	единица измерения	Заводские показатели	Расчётные показатели	проектные показатели			
				1	2	3	4
Исходные данные							
Расход ПГ	м ³ /т чугуна	111,6	111,6	111,6	111,6	70	30
Расход ПУТ	кг/т чугуна	0	0	0	0	100	200
Дутьевые параметры							
температура		941	941	1050	1050	1050	1050
кислород	%	25,9	25,9	25,9	27	27	27
Основность шлака (CaO/SiO ₂)		1,216	1,216	1,216	1,216	1,216	1,216
Степень прямого восстановления железа, (r_d)		0,293	0,293	0,298	0,298	0,31	0,32
Отношение степеней использования H ₂ и CO		1,282	1,282	1,282	1,282	1,282	1,282
Получаемые показатели							
Расход кокса, K	кг/т чугуна	504	504,103	480	479,4	404,9	329
Производительность	%	100	100	103,4	106	105,9	105,4
Теоретическая температура	°C	1949	1949	1998	2026,4	2052	2073
Объём газа-восстановителя	м ³ /т чугуна	968	968	927	925	864	806
Степень использования газа CO	%	42,3	42,3	43,5	43,6	45,7	48,1
Коэффициент замены кокса	кг/кг кокса	0	0	0	0	0,992	0,876

*Базовые данные получены по показателям ОАО "МК "Азовсталь" (доменная печь №3)

Выводы. Анализируя вышеизложенное можно сделать вывод, что эффективное решение данной задачи может быть выполнено с помощью системы учитывающей все факторы в комплексе. Для построения такой системы разработана математико-имитационная модель, учитывающая технологические изменения применения ПУТ. Анализ этапов показал, что в модели могут быть использованы методы линейного программирования. Результаты расчётов выполненных с помощью этой модели подтверждают опыт работы ОАО «ДМЗ».

Степень достоверности расчётов технических показателей доменной плавки приведенных в работе определяется точностью предложенных формул (не менее 95%), выражающих зависимость степени прямого восстановления железа и температуры колошникового газа от параметров комбинированного дутья, а также формулы использованной для определения изменения производительности под влиянием различных факторов, в том числе показателя газопроницаемости шихты. Разумеется, эти формулы по своей природе не могут претендовать на полную непогрешимость. Уточнение их или замена лучшими является наряду с совершенствованием кинетико-математических моделей доменного процесса задачей дальнейших

исследований.

Направление дальнейшего исследования. Дальнейшее развитие данного направления предполагает создание компьютерной системы выполняющей функции помощника для принятия решений по выбору оптимального варианта работы доменной печи, а также выполнять моделирование ДП, с выводом результатов, на основе выбранных показателей, с учётом использования в технологическом процессе ПУТ.

Полное решение данной задачи должно включать в себя такие подсистемы:

- сквозного расчета агломерационной и доменной шихты;
- расчета технико-экономических показателей доменной плавки (расхода кокса, производительности) при изменении дутьевых параметров, свойств кокса и состава железорудной части шихты;
- расчета свойств шлаков, обессеривающей способности конечного шлака и прогнозирования содержания серы в чугуне;
- моделирования газодинамического режима доменной плавки;
- экономико-математическая модель выбора оптимального состава поставок сырья и топлива для крупного металлургического предприятия.

Данная модель будет являться основой для системы поддержки принятия решений по оптимизации работы доменной печи.

Перечень ссылок

1. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. - М.: Металлургия, 1988. - 176 с.
2. Савчук Н.А., Курунов И.Ф. Доменное производство на рубеже XXI века //Новости черной металлургии за рубежом. - 2000. - Часть II. - Приложение 5. - М.: ОАО «Черметинформация». - 42 с.
3. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: «Металлургия», 1980. – 304с.